PHYSIOLOGIE DE L'APPAREIL LOCOMOTEUR

Anatomie fonctionnelle

II

Membre inférieur



A. I. KAPANDJI

6e édition

MALOINE

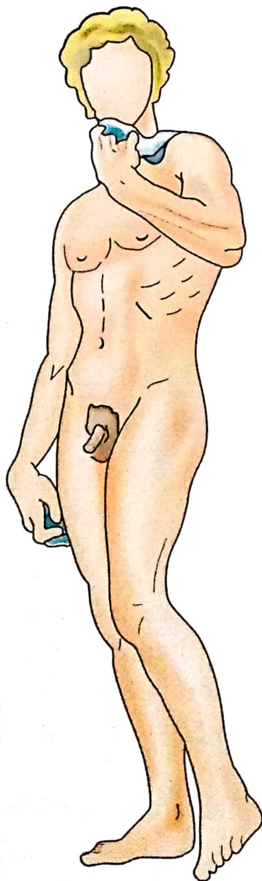
Docteur A.I. KAPANDJI

Membre d'honneur de la Société Française d'Orthopédie et de Traumatologie
Membre d'honneur et Président 1987-1988 de la Société Française de Chirurgie de la Main (GEM)
Membre de la Société Américaine (ASSH) et de la Société Italienne (SICM) de Chirurgie de la Main
Membre correspondant étranger de la Société Argentine d'Orthopédie et de Traumatologie
Pionnier de la Chirurgie de la Main (Congrès Sydney 2007 de l'IFSSH)

ANATOMIE FONCTIONNELLE

Préface du Professeur Thierry JUDET

2



6e édition, 2e tirage

1. Hanche
2. Genou
3. Cheville
4. Pied
5. Voûte plantaire
6. Marche

798 dessins originaux de l'auteur

MALOINE
www.maloine.fr
2012

Chez le même éditeur :

A.I. Kapandji, *Anatomie fonctionnelle, Tome 1. Épaule – Coude – Prono-supination – Poignet – Main*, 6e édition.

A.I. Kapandji, *Anatomie fonctionnelle, Tome 3. Rachis – Ceinture pelvienne – Rachis lombal – Rachis dorsal – Rachis cervical – Tête*, 6e édition.

A.I. Kapandji, *Dessins de main.*

P. Kamina, *Atlas d'anatomie. Morphologie – Fonction – Clinique.*

P. Kamina, *Précis d'anatomie clinique* :
Tome 1. Anatomie générale – Membres, 4e édition.
Tome 2. Tête – Cou – Dos, 3e édition.
Tome 3. Thorax – Abdomen, 3e édition.
Tome 4. Organes urinaires et génitaux – Pelvis – Coupes du tronc, 2e édition.
Tome 5. Neuroanatomie.

M. Schünke, E. Schulte, U. Schumacher, M. Voll, K. Wesker, *Atlas d'anatomie Prométhée* :
Tome 1. Anatomie générale – Système locomoteur.
Tome 2. Cou – Thorax – Abdomen – Pelvis.
Tome 3. Crâne – Neuroanatomie.

A.M. Gilroy, B.R. MacPherson, L.M. Ross, M. Voll, K. Wesker, *Atlas d'anatomie.*

B. Reichert, *Anatomie in vivo* :
Tome 1. Étude et palpation des membres inférieurs et supérieurs.
Tome 2. Étude et palpation du tronc et de la tête.

DESSINS
Conception et réalisation : A.I. Kapandji (kap-vega@wanadoo.fr)

ôt légal : octobre 2009 – ISBN : 978-2-224-03214-2
imé en Italie.

À ma femme
À ma mère, artiste peintre
À mon père, chirurgien
À mon grand-père maternel, mécanicien

Préface

« Vas voir dans le Kapandji, tu comprendras ! »
Qui de ma génération ou de celles qui ont suivi n'a jamais, après y avoir lui-même passé de longues heures, ainsi apostrophé un jeune collègue ? Que ce soit pour la compréhension d'une symptomatologie, d'un geste d'examen clinique ou d'un temps opératoire, la connaissance de l'anatomie et de la mécanique que permet cette *Anatomie fonctionnelle* est le fondement de notre métier.
À la suite des grands anatomistes, incontournables mais parfois rébarbatifs, Adalbert Kapandji a su, dès ses premiers fascicules, apporter une nouvelle dimension à la compréhension et surtout à l'enseignement de l'anatomie fonctionnelle : tout devient clair, simple, et le lecteur se prend à imaginer qu'il est devenu un peu plus intelligent !

Merci, Kap : tout peut paraître facile, quand le génie est caché derrière la réalisation.
Génie, peut-être, mais sûrement fait d'une culture encyclopédique : ce tome vient après le membre supérieur et le rachis. Génie, peut-être, mais appuyé sur une perfection du geste, que ce soit dans le trait du dessin ou dans l'élégance et l'efficacité du geste chirurgical. Génie, peut-être, mais alimenté par une fertile imagination ; qu'elle soit appliquée à la chirurgie ou à l'explication du « pourquoi » et du « comment » de l'anatomie et de la fonction.
Génie, enfin, d'une approche didactique irréprochable, qui n'a pas fléchi dans le temps.

En témoigne cette nouvelle édition, complétée et enrichie plus encore que les précédentes, à laquelle doit être réservée une place de choix dans la bibliothèque de tous ceux qui s'intéressent au mouvement : étudiants ou praticiens confirmés, chirurgiens, rhumatologues, rééducateurs, ainsi que tous les thérapeutes de l'appareil locomoteur.

Pr Thierry Judet

Avertissement à la sixième édition

Avec cette 6[e] édition du Volume 2 de l'ouvrage sur l'*Anatomie fonctionnelle* s'achève la refonte et la mise à jour des trois volumes parus sur ce sujet.

La mise en couleurs de tous les schémas a représenté un gros travail de l'auteur, réalisé sur informatique. Les schémas en sont d'autant plus expressifs et démonstratifs. Cette métamorphose, au sens propre du terme, fut aussi l'occasion d'une réécriture du texte.

Cette nouvelle édition comporte aussi de nombreux ajouts et améliorations, non seulement dans des chapitres déjà existants, mais aussi dans de nouveaux chapitres comme « La Marche » et le « Tableau synoptique des nerfs du membre inférieur ».

Enfin, pour rester dans la ligne des « Schémas en relief », des modèles mécaniques à réaliser par le lecteur sont disponibles en fin d'ouvrage, véritables travaux pratiques de biomécanique. Certains, trop compliqués, ont été supprimés ou simplifiés, d'autres ont été introduits.

Dernière innovation, le titre *Physiologie articulaire* nous a semblé par trop réducteur. Nous lui préférons maintenant *Anatomie fonctionnelle* car depuis la publication en 1965 des premiers volumes de cette série, des chapitres d'anatomie fonctionnelle sont venus compléter tous les ouvrages consacrés à l'anatomie pure. Il est donc normal que l'anatomie fonctionnelle prenne maintenant la place qui lui revient et qu'elle s'adresse non seulement aux élèves kinésithérapeutes, mais aussi à tous les étudiants en médecine, aux médecins et aux chirurgiens en exercice qui désirent approfondir leurs connaissances du fonctionnement de l'appareil locomoteur.

Table des matières

Chapitre 3 – LA CHEVILLE 156

Chapitre 4 – LE PIED 178

Chapitre 5 – LA VOÛTE PLANTAIRE 23

Chapitre 6 – LA MARCHE 262

ANNEXES 291

Chapitre 1

LA HANCHE

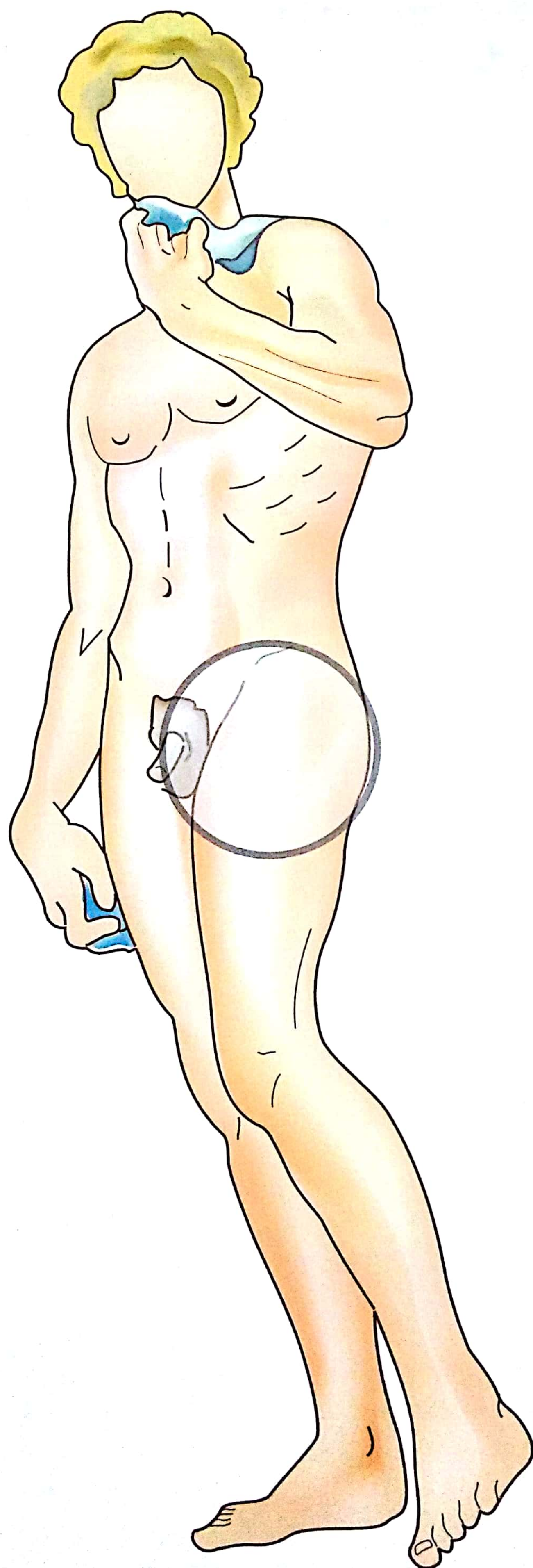
L'articulation coxo-fémorale

Lors du passage de la station quadrupède à la position bipède, la hanche, qui était l'articulation proximale du membre postérieur, est devenue l'articulation de la racine du membre inférieur, tandis que l'articulation proximale du membre antérieur, l'épaule, est devenue celle du membre supérieur. Le **membre supérieur** a perdu sa fonction de support et de locomotion, pour devenir un **membre suspendu**, dévolu à la **préhension** grâce à la main dont il est le support logistique.

Simultanément, le **membre inférieur** a conservé sa fonction de locomotion et, de ce fait, il est devenu exclusivement le **membre porteur et locomoteur**. La hanche assume donc à elle seule ce rôle de support du tronc aussi bien en position statique que lors de la locomotion. Ce rôle porteur l'a profondément transformée.

Alors que l'épaule est fonctionnellement un complexe articulaire, une seule articulation, **la hanche**, assume la **fonction d'orientation et de support** du membre inférieur. La hanche, ou articulation coxo-fémorale, est de ce fait dotée d'une moins grande amplitude de mouvements – compensée dans une certaine mesure par le rachis lombaire – mais par contre elle est nettement plus stable – c'est l'articulation la plus difficile à luxer de tout le corps. Ces caractéristiques rendent bien compte de sa fonction de support du poids du corps et de locomotion.

C'est au niveau de la hanche que s'est ouverte l'ère des *prothèses articulaires* qui ont transformé la chirurgie de l'appareil locomoteur. Cette articulation, en apparence la plus facile à modéliser, puisque ses surfaces articulaires sont très voisines de celle d'une sphère, pose encore de nombreux problèmes : dimension de la sphère prothétique, nature des surfaces en contact liée aux questions de coefficient de frottement, de résistance à l'usure, de toxicité éventuelle des débris d'usure, et surtout *mode de liaison avec l'os vivant* dominé par la question du scellement ou pas, certaines prothèses pouvant acquérir une fixation secondaire grâce à la réhabitation de leurs surfaces. C'est à propos de la hanche que la recherche sur les prothèses a été la plus poussée et que le nombre de modèles proposés est le plus grand.



La hanche, articulation à la racine du membre inférieur

La hanche est l'**articulation proximale du membre inférieur** : située à sa racine, elle a pour fonction de l'orienter dans toutes les directions de l'espace, c'est pourquoi elle possède trois axes et trois degrés de liberté **(Fig. 1)** :

- un **axe transversal XOX'**, situé dans un *plan frontal* autour duquel s'effectuent les mouvements de **flexion-extension** ;
- un **axe sagittal YOY'**, situé dans un *plan antéro-postérieur* passant par le centre **O** de l'articulation, autour duquel s'effectuent les mouvements d'**abduction-adduction** ;
- un **axe vertical OZ**, qui, lorsque la hanche est en position de rectitude, se confond avec l'*axe longitudinal* **OR** du membre inférieur. Cet axe longitudinal permet les mouvements de **rotation externe** et de **rotation interne** de l'ensemble du membre inférieur.

Les mouvements de la hanche sont réalisés par une seule articulation, l'articulation coxo-fémorale. C'est une énarthrose, c'est-à-dire une articulation de *type sphérique*, très emboîtée. Ceci l'oppose à l'articulation de l'épaule, véritable complexe articulaire dans lequel l'articulation scapulo-humérale est aussi une énarthrose mais à faible emboîtement, possédant une grande mobilité au détriment de la stabilité.

L'articulation coxo-fémorale jouit d'une moins grande amplitude de mouvement – compensée dans une certaine mesure par le rachis lombaire. Cet inconvénient est contre-balancé par une plus grande stabilité.

L'articulation coxo-fémorale travaille en *compression*, car elle supporte le poids du corps, à l'inverse de l'articulation scapulo-humérale qui travaille en élongation.

Bien qu'elle soit, comme l'épaule, une articulation à trois axes et trois degrés de liberté, la hanche ne possède pas d'amplitudes assez grandes, en particulier dans l'abduction, pour qu'on puisse observer, à son niveau, un phénomène équivalent au paradoxe de Codmann à l'épaule : ce pseudo-paradoxe (voir Volume I) n'existe pas pour le membre inférieur.

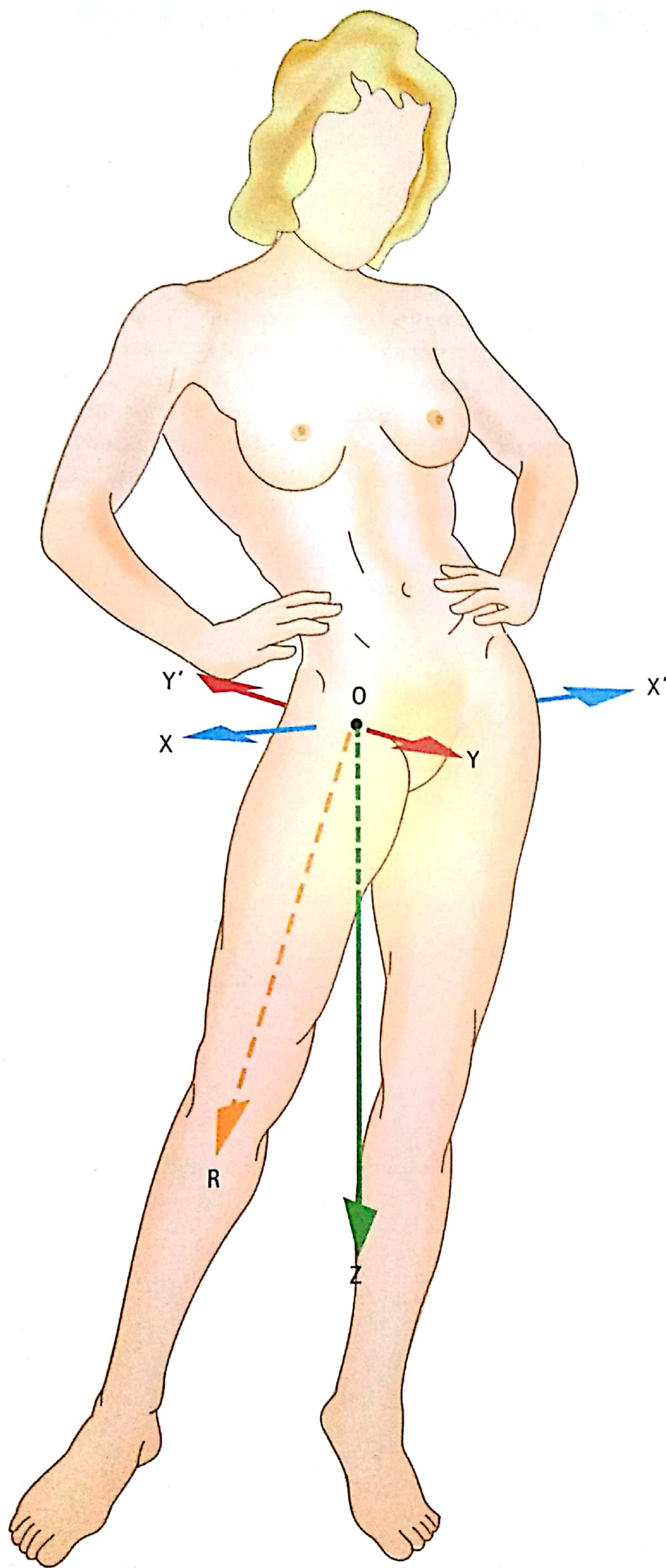


Fig. 1

Les mouvements de flexion de la hanche

La flexion de la hanche est le mouvement qui porte la face antérieure de la cuisse à la rencontre du tronc, si bien que la cuisse et l'ensemble du membre inférieur se trouvent reportés en avant du plan frontal passant par l'articulation.

L'**amplitude de la flexion** est variable suivant divers facteurs.

- Dans l'ensemble, la **flexion active** de la hanche est moins ample que la flexion passive. La *position du genou* intervient également dans l'amplitude de la flexion : lorsque le genou est *étendu* **(Fig. 2)**, la flexion n'est que de 90°, tandis que lorsque le genou est *fléchi* **(Fig. 3)**, elle atteint ou dépasse 120°.
- En ce qui concerne la **flexion passive**, son amplitude dépasse toujours 120°, mais là encore la position du genou a son importance : s'il est *étendu* **(Fig. 4)**, la flexion est nettement moins marquée que lorsqu'il est *fléchi* **(Fig. 5)** ; dans ce cas, l'amplitude dépasse 140° et la cuisse touche presque le thorax. Nous verrons plus loin (p. 150) comment la flexion du genou, en relâchant les muscles ischio-jambiers, autorise une plus grande flexion de la hanche.
- **Si les deux hanches sont fléchies** passivement et simultanément, alors que les genoux sont eux-mêmes fléchis **(Fig. 6)** la face antérieure des cuisses vient prendre largemen contact avec le tronc car, à la flexion des articulations coxo fémorales, s'ajoute la *bascule du pelvis vers l'arrière* pa redressement de la lordose lombaire **(flèche)**.

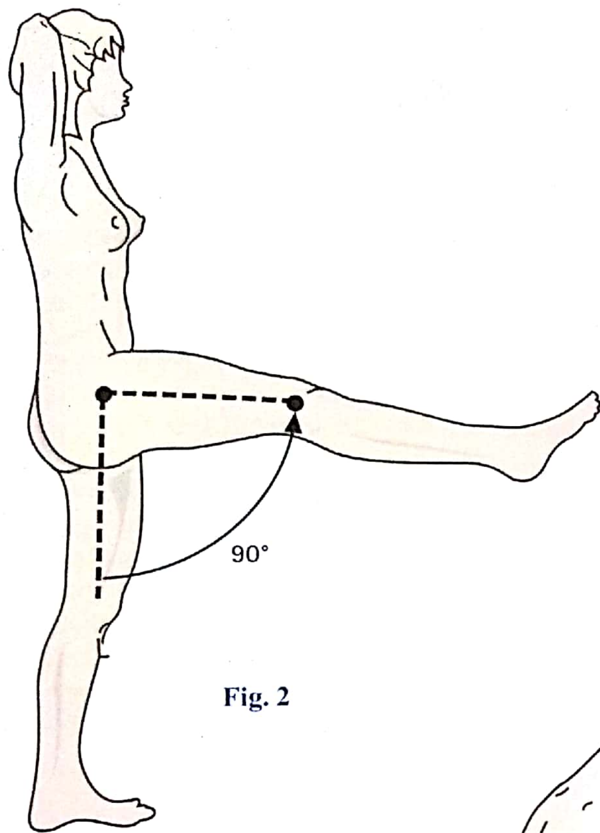


Fig. 2

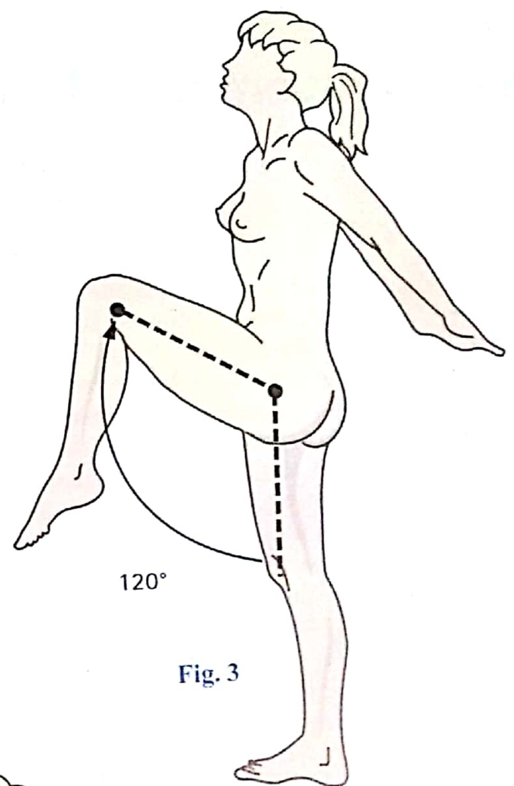


Fig. 3

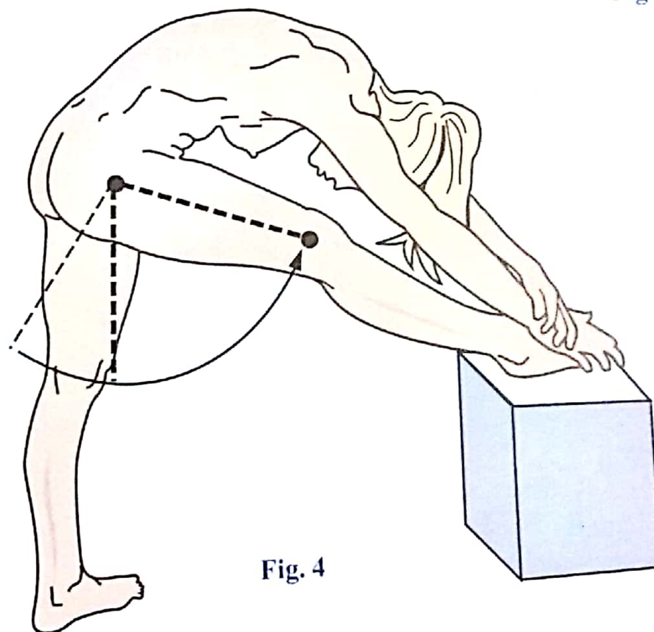


Fig. 4

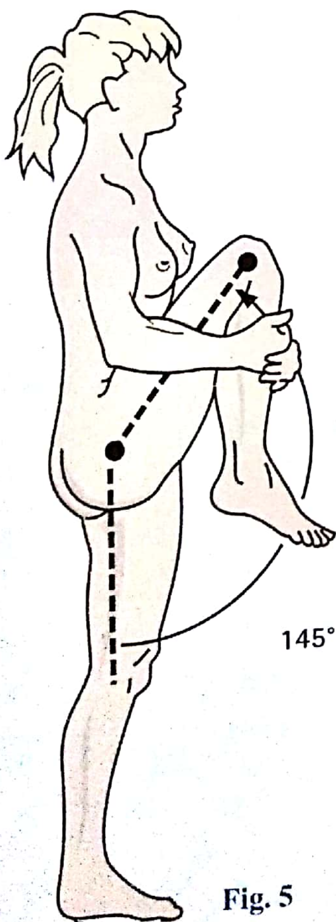


Fig. 5

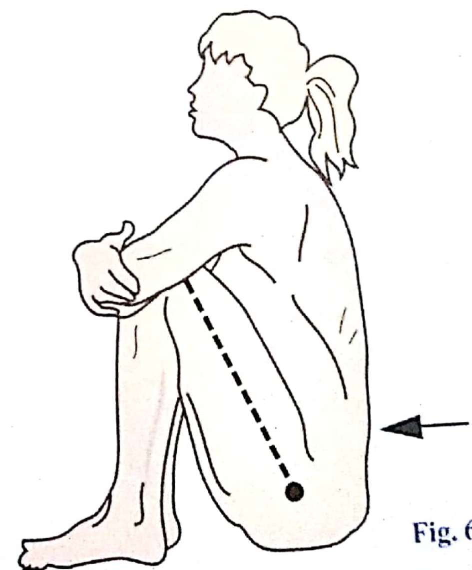


Fig. 6

Les mouvements d'extension de la hanche

L'extension porte le membre inférieur *en arrière du plan frontal.*

L'amplitude de l'extension de la hanche est notablement plus faible que celle de la flexion. Elle est limitée par la mise en tension du ligament ilio-fémoral (voir p. 36).

L'**extension active** est moins ample que l'extension passive. Sur **genou étendu (Fig. 7)**, l'extension est plus ample (20°) que sur **genou fléchi (Fig. 8)** ; ceci est dû au fait que les muscles ischio-jambiers perdent alors leur efficacité en tant qu'extenseurs de la hanche, car ils ont utilisé une grande partie de leur course pour la flexion du genou (voir p. 150).L'**extension passive** n'est que de 20° dans la **fente avant (Fig. 9)** ; elle atteint 30° lorsque le membre inférieur est fortement tiré en haut et en arrière par la main homolatérale **(Fig. 10)**.

Notez que l'extension de la hanche est notablement augmentée par la bascule du pelvis en avant, grâce à une *hyperlordose lombaire*. Cette participation du rachis lombaire peut être mesurée sur les **figures 7 et 8** par l'angle compris entre la verticale **(tirets fins)** et la position de rectitude de la cuisse **(tirets moyens)**. Cette position de rectitude est repérée grâce à l'angle immuable qu'elle forme avec la ligne joignant le centre de la hanche et l'épine iliaque antérieure et supérieure. Cependant cet angle varie avec les sujets car il dépend de la statique pelvienne, c'est-à-dire du degré de bascule du pelvis vers l'avant ou vers l'arrière.

Les amplitudes données ici s'entendent pour un sujet « normal » non entraîné. Elles peuvent être considérablement *augmentées par l'exercice et l'entraînement* ; les danseuses, par exemple, peuvent faire couramment le *grand écart* par fente avant **(Fig. 11)** même sans appui au sol, grâce à un assouplissement de leur ligament ilio-fémoral ; cependant il faut remarquer qu'elles compensent l'insuffisance relative d'extension de la cuisse postérieure par une importante bascule du pelvis vers l'avant.

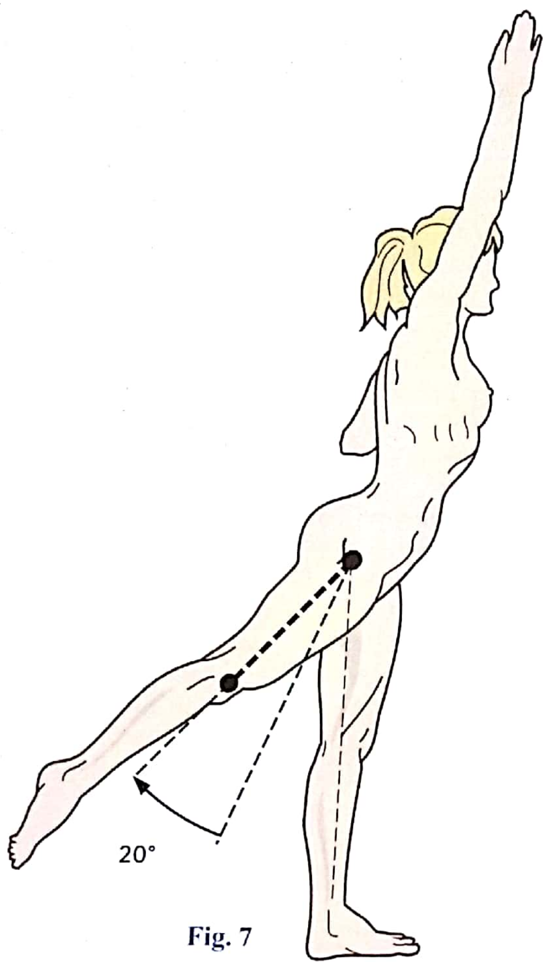


Fig. 7

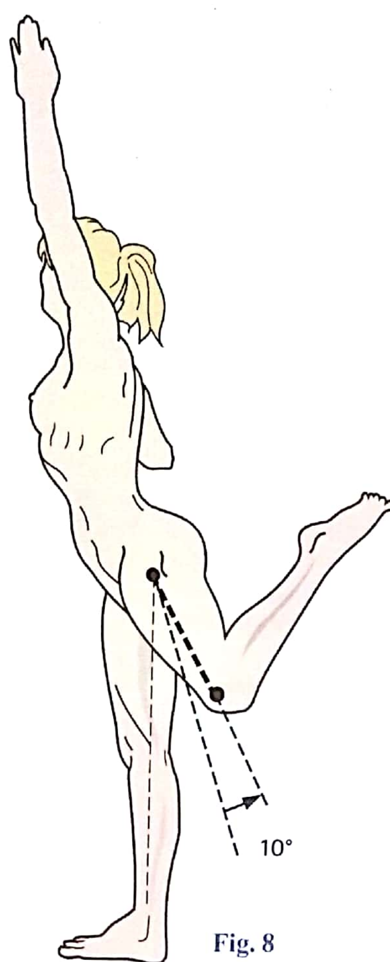


Fig. 8

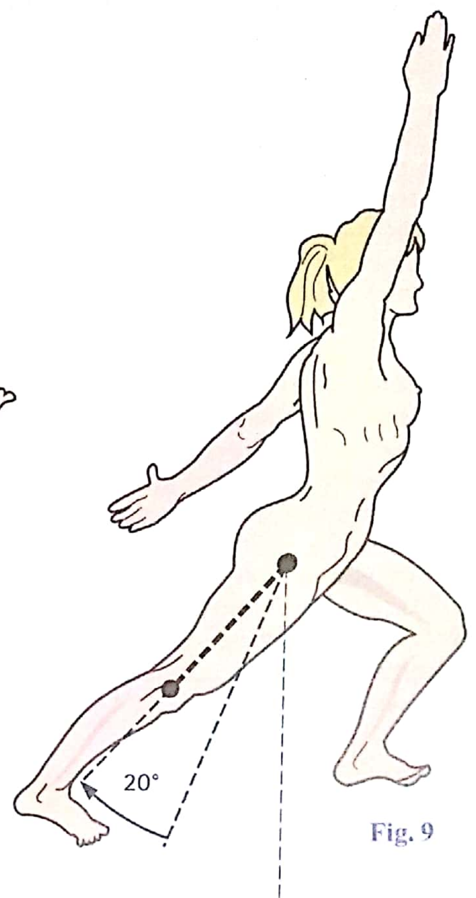


Fig. 9

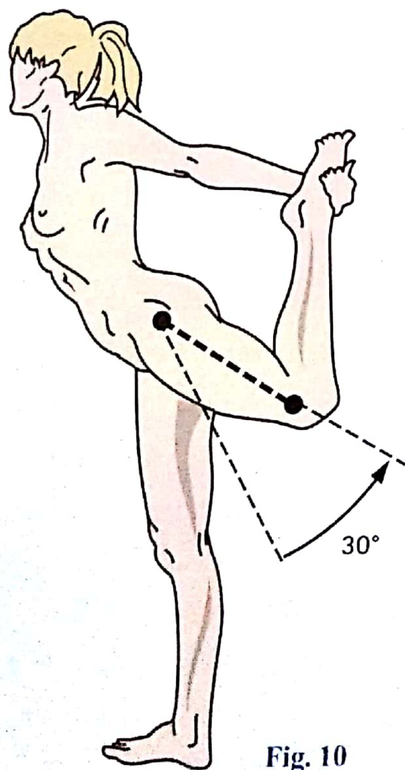
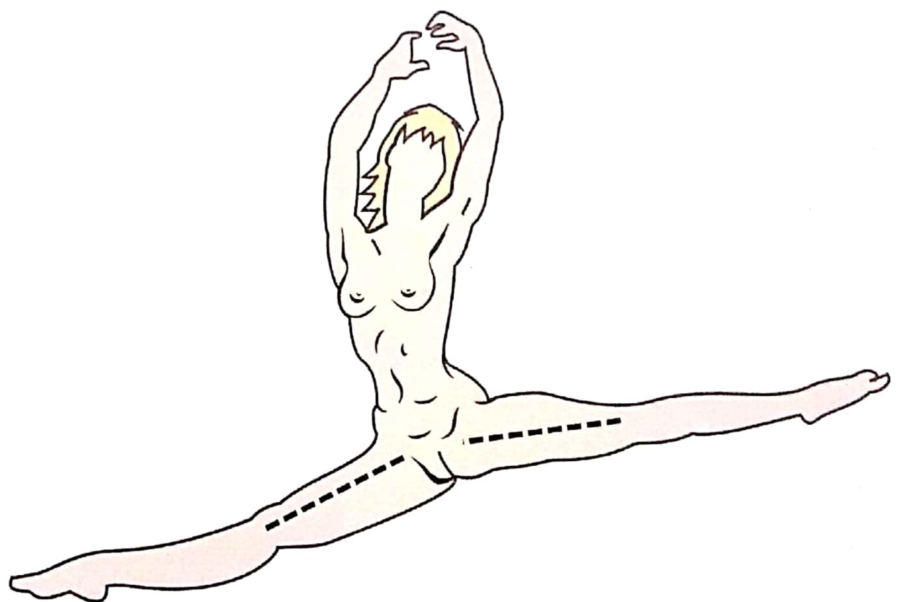


Fig. 10


Fig. 11

Les mouvements d'abduction de la hanche

L'abduction porte le membre inférieur directement *en dehors* et *l'éloigne du plan de symétrie* du corps.

Théoriquement, il est tout à fait possible d'effectuer un mouvement d'**abduction au niveau d'une seule hanche** ; en pratique, l'abduction d'une hanche s'accompagne automatiquement d'une abduction égale dans l'autre hanche. Ceci est net à partir de 30° **(Fig. 12)**, amplitude pour laquelle on commence à apprécier la *bascule du pelvis* par l'inclinaison de la ligne joignant les deux fossettes sacro-lombaires (qui correspondent à la projection cutanée des épines iliaques postérieures et supérieures). En prolongeant l'axe des deux membres inférieurs, on constate qu'ils se coupent sur l'axe de symétrie du pelvis : on peut donc en déduire que dans cette position, chacune des hanches est en abduction de 15°.

Lorsqu'on pousse le mouvement en **abduction maximum (Fig. 13)**, l'angle formé entre les deuxmembres inférieurs atteint 90°. On retrouve encore cette symétrie d'abduction des deux hanches, d'où l'on déduit que l'amplitude maximum de l'abduction d'une hanche est de 45°. Notez qu'à ce moment, le pelvis est incliné à 45° sur l'horizontale, du côté porteur. Le rachis, dans son ensemble, compense cette inclinaison du pelvis par une incurvation convexe vers le côté porteur. Nous retrouvons encore ici la *participation du rachis* aux mouvements de la hanche.

L'abduction est limitée par la butée osseuse du col fémoral sur le limbus de l'acétabulum (voir p. 34) ; mais bien avant interviennent les muscles adducteurs et les ligaments ilio- et pubo-fémoraux (voir p. 42).

Par l'*exercice* et l'*entraînement*, il est possible d'augmenter notablement l'amplitude maximum de l'abduction. C'est le cas des danseuses qui peuvent atteindre 120° **(Fig. 14)** à 130° **(Fig. 15)** d'abduction active, c'est-à-dire sans appui. Pour l'abduction passive, les sujets entraînés peuvent atteindre les 180° du grand écart frontal **(Fig. 16)** ; en réalité, il ne s'agit plus d'abduction pure, car pour détendre les ligaments ilio-fémoraux, le pelvis bascule vers l'avant **(Fig. 17)** tandis que le rachis lombaire s'incurve en hyperlordose **(flèche)** : la hanche est donc en abduction-flexion.

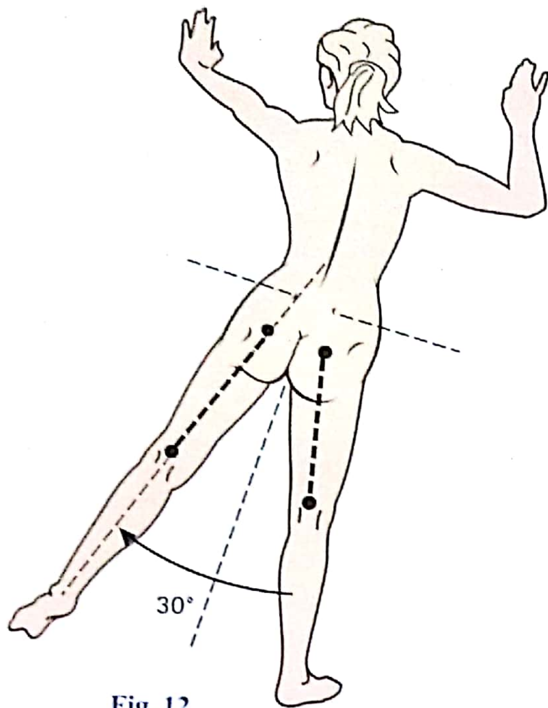


Fig. 12

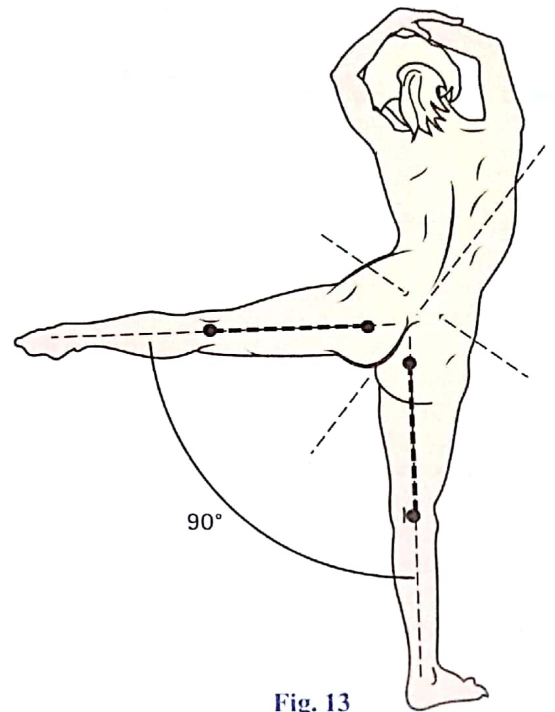


Fig. 13

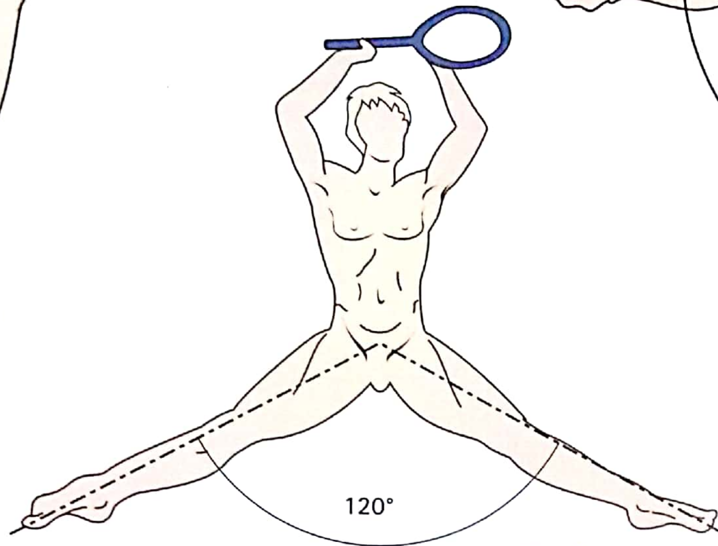


Fig. 14

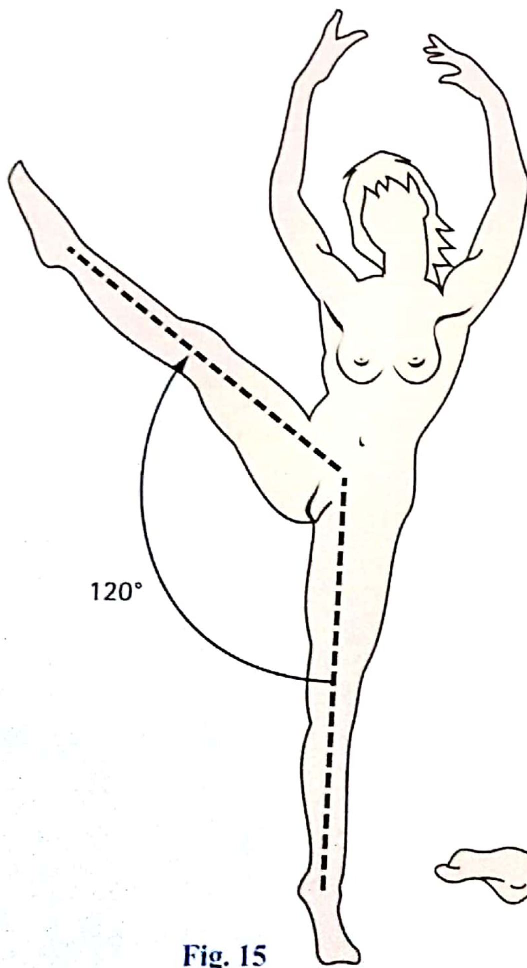
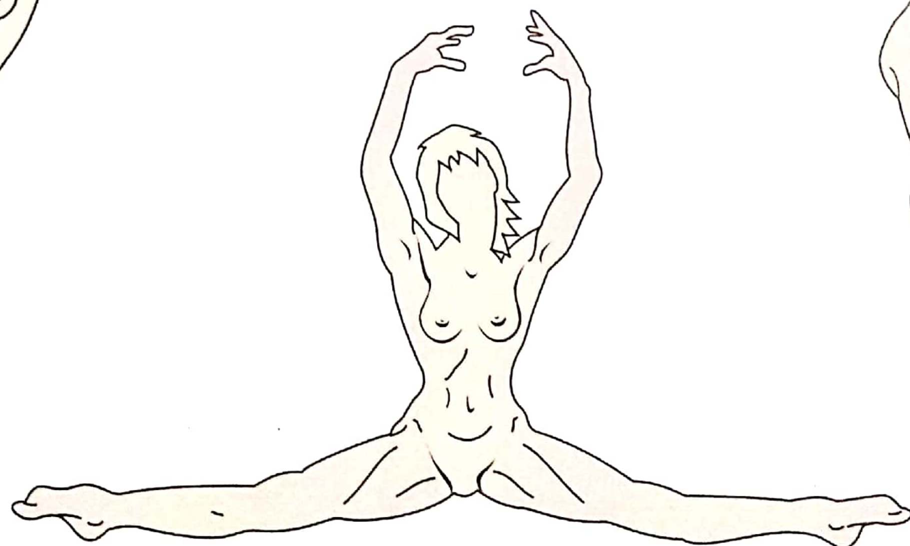
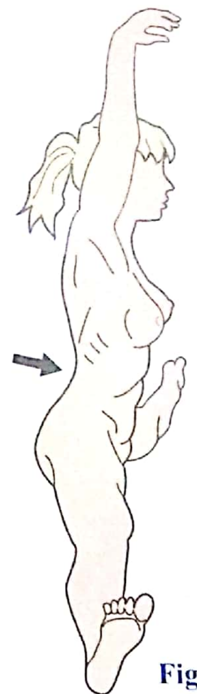


Fig. 15


Fig. 16


Fig. 17

Les mouvements d'adduction de la hanche

L'adduction porte le membre inférieur *en dedans* et le *rapproche du plan de symétrie du corps*. Comme dans la position de référence, les deux membres inférieurs sont en contact l'un avec l'autre, il n'existe pas de mouvement d'adduction « pure ».

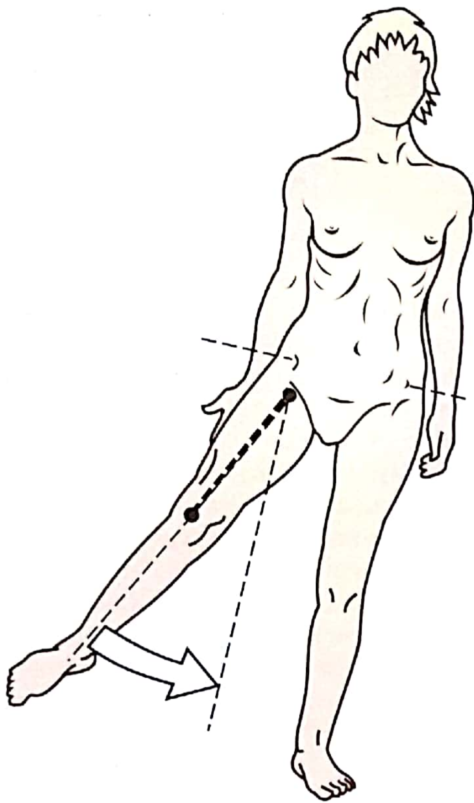
Par contre, il existe des mouvements d'**adduction relative** **(Fig. 18)** lorsque, à partir d'une position d'abduction, le membre inférieur se porte en dedans.

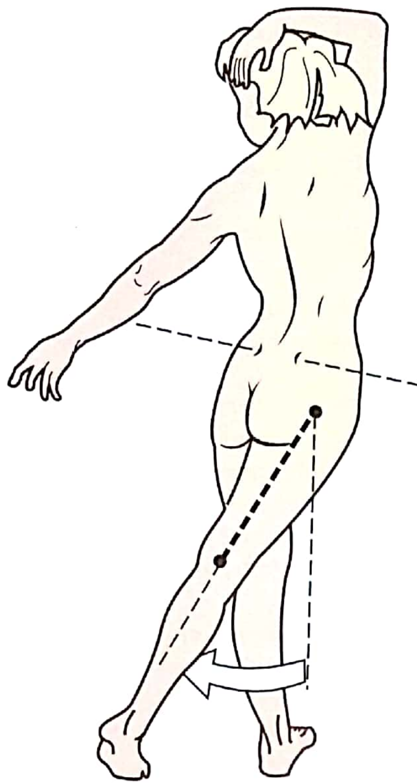
Il existe aussi des mouvements d'**adduction combinée à une extension** de la hanche **(Fig. 19)** et des mouvements d'**adduction combinée à une flexion** de la hanche **(Fig. 20)**.

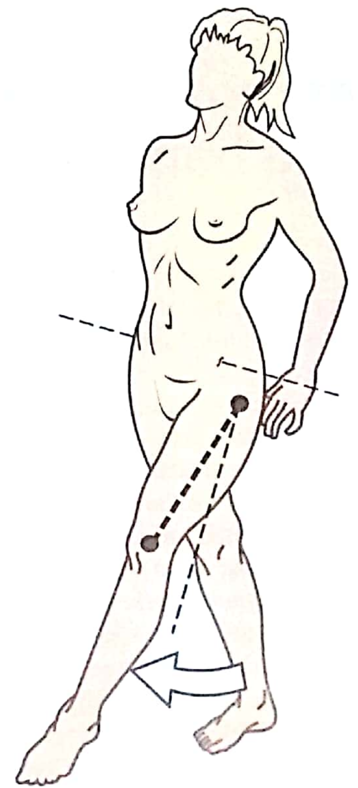
Il existe enfin des mouvements d'**adduction d'une hanche combinée à une abduction dans l'autre hanche** **(Fig. 21)** ; ils s'accompagnent d'une inclinaison du pelvis et d'une incurvation du rachis. À noter : à partir du moment où les pieds sont écartés – et cela est nécessaire pour assurer l'équilibre du corps –, l'angle d'adduction d'une hanche n'est pas tout à fait égal à l'angle d'abduction dans l'autre **(Fig. 22)** : leur différence est égale à l'angle formé par les axes des deux membres inférieurs dans la position symétrique de départ.

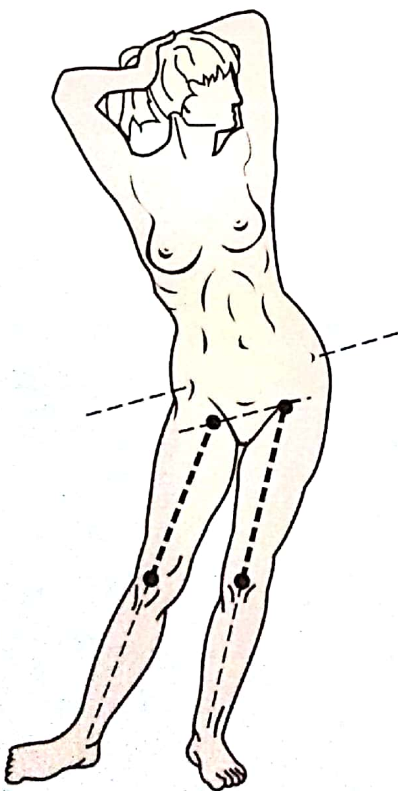
Dans tous ces mouvements d'adduction combinée, l'amplitude maximum de l'adduction est de 30°.

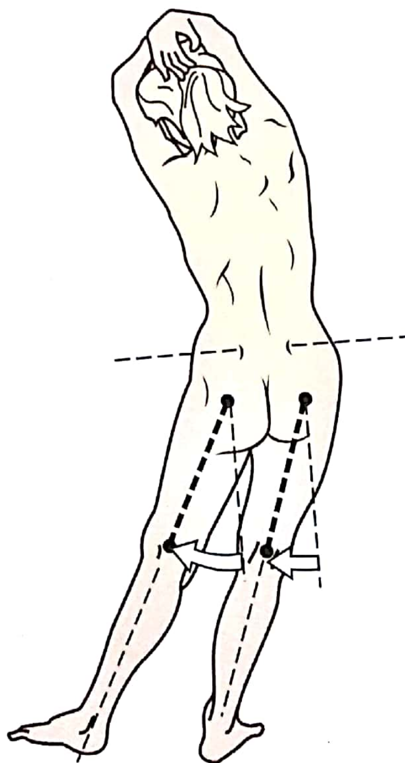
Parmi tous ces mouvements d'adduction combinée, il en est un qui réalise une position très usuelle **(Fig. 23)** : la **position assise jambes croisées** l'une sur l'autre. L'adduction s'associe alors à une flexion et à une rotation externe. C'est la position où la hanche est la plus instable (voir p. 38). Elle est souvent adoptée par le passager ou la passagère avant d'une automobile, ce qui l'expose à la luxation par choc sur le tableau de bord.

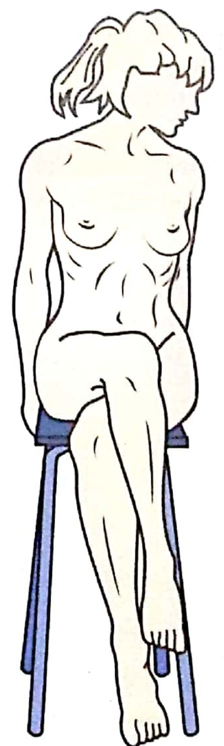

Fig. 18


Fig. 19


Fig. 20


Fig. 21


Fig. 22


Fig. 23

Les mouvements de rotation longitudinale de la hanche

Les mouvements de rotation longitudinale de la hanche s'effectuent autour de l'*axe mécanique du membre inférieur* **(voir axe OR, Fig. 1)**.

En position de rectitude, cet axe est confondu avec l'*axe vertical* de l'articulation coxo-fémorale **(voir axe OZ, Fig. 1)**. Dans ces conditions, la **rotation externe** est le mouvement qui porte la pointe du pied en dehors, alors que la **rotation interne** porte la pointe du pied en dedans. Le genou étant *étendu* complètement, il n'existe à son niveau aucun mouvement de rotation (voir p. 136), la hanche seule en est responsable.

Ce n'est pourtant pas la position employée pour apprécier l'amplitude des mouvements de rotation. Il est bien préférable de faire cette étude sur le sujet couché sur le ventre, ou assis au bord d'une table, le genou étant *fléchi à angle droit*.

Le sujet étant **couché sur le ventre**, la **position de référence (Fig. 24)** est obtenue lorsque la jambefléchie à angle droit sur la cuisse est verticale. À partir de cette position, lorsque la jambe s'incline *en dehors*, on mesure la *rotation interne* **(Fig. 25)**, dont l'amplitude totale est de 30 à 40°. Lorsque la jambe s'incline *en dedans*, on mesure la *rotation externe* **(Fig. 26)**, dont l'amplitude totale est de 60°.

Le sujet étant **assis sur le bord d'une table**, hanche et genou fléchis à angle droit, on mesure de la même manière la **rotation externe** lorsque la jambe se porte *en dedans* **(Fig. 27)**, la cuisse tournant sur place, et la **rotation interne** lorsque la jambe se porte *en dehors* **(Fig. 28)**. Dans cette position, l'amplitude totale de la rotation externe peut être plus grande que dans la position couchée, car la flexion de la hanche détend les ligaments ilio- et pubo-fémoraux qui sont les principaux facteurs limitant la rotation externe (voir p. 40).

Dans la **position « en tailleur » (Fig. 29)**, la rotation externe se combine avec une flexion dépassant 90° et une abduction. Les adeptes du yoga arrivent à pousser la rotation externe à un point tel que les axes des deux jambes sont parallèles, superposés et horizontaux (position dite « du lotus »).

L'amplitude des rotations dépend de l'angle d'antéversion du col fémoral. Cette antéversion est, en général, très marquée chez le jeune enfant, ce qui entraîne une rotation interne du squelette jambier – l'enfant marche « les pieds en dedans » et très souvent il a un pied plat valgus bilatéral. Avec la croissance, l'angle d'antéversion revient à une valeur normale, ce qui fait disparaître les troubles précités. Il faut cependant citer une circonstance où l'antéversion peut se trouver pérennisée et même exagérée : certains jeunes enfants prennent l'habitude néfaste de s'asseoir par terre *entre leurs deux talons*, les genoux étant *fléchis* ; cela entraîne une rotation interne du fémur et, la plasticité du squelette étant encore très grande, une antéversion exagérée des cols fémoraux. Il existe un moyen de redresser une telle situation : obliger l'enfant à adopter une habitude inverse, c'est-à-dire à s'asseoir en tailleur, ou mieux, dans la position de yoga, ce qui, avec le temps, modèle le col dans le sens de la rétroversion.

La **mesure de l'angle d'antéversion des cols fémoraux** soulevait jusqu'à maintenant, par la méthode radiologique classique, certaines difficultés d'interprétation des résultats. Actuellement, grâce au **scanner**, cette mesure est effectuée de façon simple et précise. Il faut donc utiliser cette méthode lorsqu'on cherche à apprécier les mal-rotations des membres inférieurs, car le trouble *part* en général de la hanche.

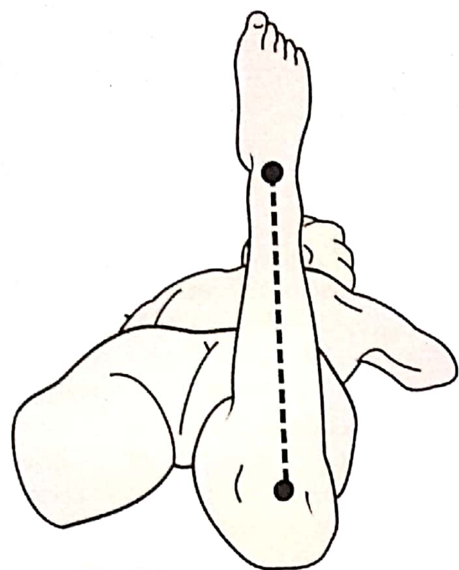


Fig. 24

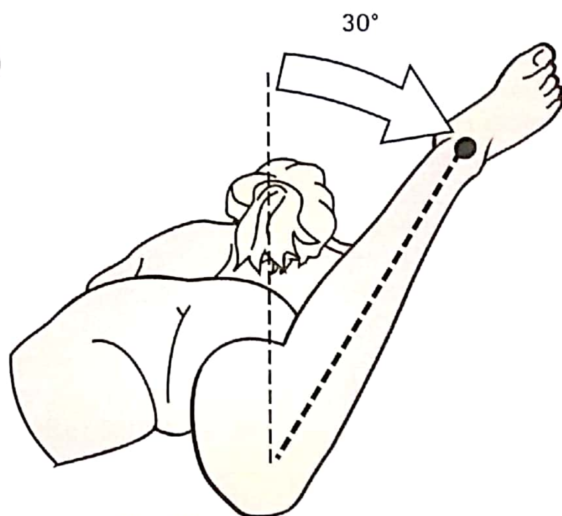


Fig. 25

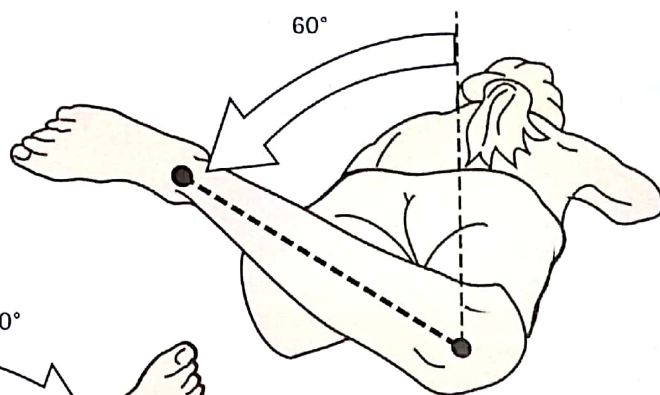


Fig. 26

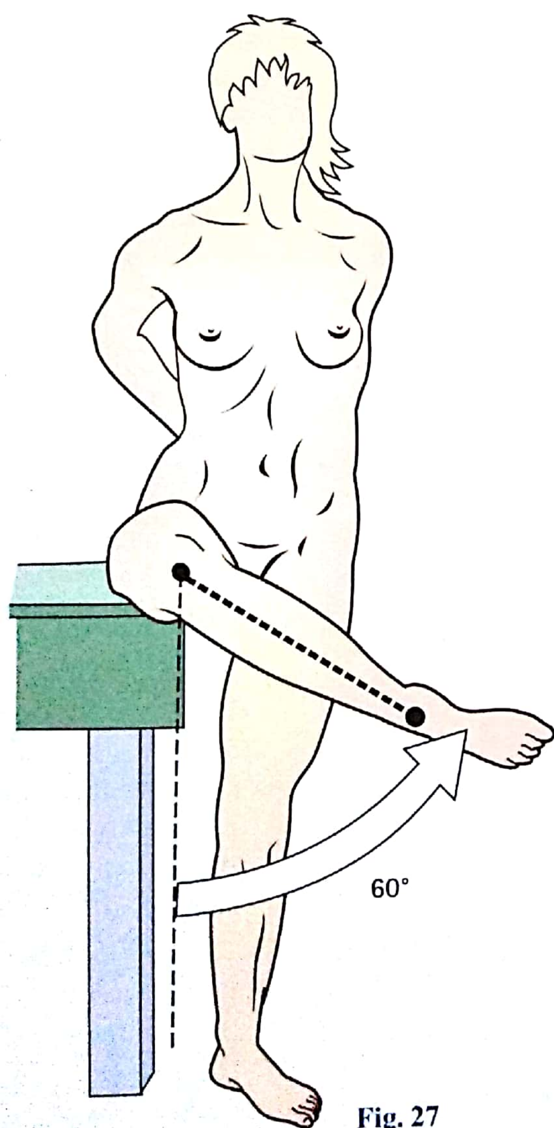


Fig. 27

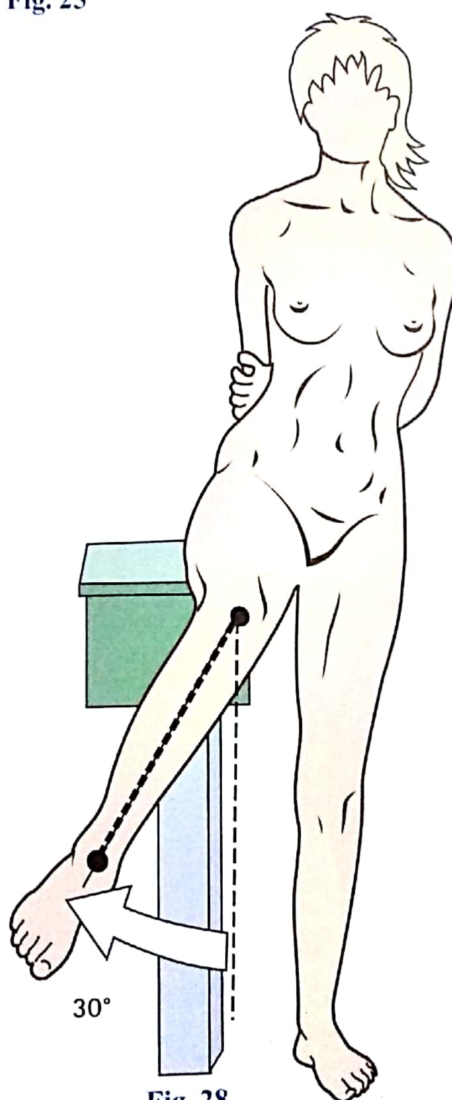


Fig. 28



Fig. 29

Le mouvement de circumduction de la hanche

Comme pour toutes les articulations à trois degrés de liberté, le mouvement de circumduction de la hanche se définit comme étant la *combinaison des mouvements élémentaires effectués simultanément autour des trois axes*. Lorsque la circumduction est poussée jusqu'à son *amplitude extrême*, l'axe du membre inférieur décrit dans l'espace un *cône* dont le sommet est occupé par le centre de l'articulation coxo-fémorale : c'est le **cône de circumduction (Fig. 30)**.

Ce cône est loin d'être régulier car les amplitudes extrêmes ne sont pas égales dans toutes les directions de l'espace ; la trajectoire décrite par l'extrémité du membre inférieur n'est donc pas un cercle mais une *courbe sinueuse* parcourant différents secteurs de l'espace déterminés par l'*intersection des trois plans de référence* :

A. le plan sagittal, dans lequel s'effectuent les mouvements de flexion-extension ;
B. le plan frontal, dans le quel d'effectuent les mouvements d'abduction-adduction ;
C. le plan horizontal.

Les huit secteurs d'espace étant numérotés de I à VIII, on voit que la trajectoire traverse *successivement* les secteurs III, II, I, IV, V et VIII. Remarquez comment la trajectoire *contourne le membre porteur* ; si ce dernier s'effaçait, la trajectoire se trouverait reportée légèrement en dedans. La **flèche R** qui prolonge en bas, en avant et en dehors le membre inférieur dans le secteur IV représente l'**axe du cône de circumduction**, qui correspond à la *position de fonction* et d'*immobilisation de la hanche*.

Strasser a proposé d'**inscrire cette trajectoire sur une sphère (Fig. 31)** dont le centre **O** est occupé par le centre de l'articulation coxo-fémorale, dont le rayon **OL** est constitué par le fémur et dont l'axe des pôles **EI** est horizontal. Sur cette sphère, on peut repérer les amplitudes extrêmes grâce à un système de méridiens et de parallèles (non dessinés ici).

C'est le même système de cotation qu'il a proposé pour l'épaule, mais dans ce dernier cas, il est certainement plus intéressant car la rotation sur l'axe longitudinal est plus importante pour le membre supérieur que pour le membre inférieur.

À partir d'une position déterminée **OL** du fémur, l'articulation peut effectuer des mouvements d'abduction **(flèche Ab)** ou d'adduction **(Ad)** en parcourant le méridien horizontal **MH**, des mouvements de *rotation interne* **(flèche Ri)** ou de *rotation externe* **(Re)** par rotation autour de l'axe **OL**. Quant aux mouvements de *flexion-extension*, ils sont de deux types suivant qu'ils s'effectuent dans le sens d'un parallèle **P** – on dit alors que la flexion **F1** est *circumpolaire* ; ou dans le sens d'un grand cercle **C** – on dit alors que la flexion **F2** est *circumcentrale*. La flexion **F2** se décompose en **F1**, déjà vue et **F3**, sur le méridien **MH**.

Ces distinctions semblent sans grande valeur pratique.

Plus intéressant, par contre, est le fait qu'en raison de l'amplitude limitée de l'abduction, *on ne peut reproduire pour la hanche le pseudo-paradoxe de Codmann* (voir Volume I).

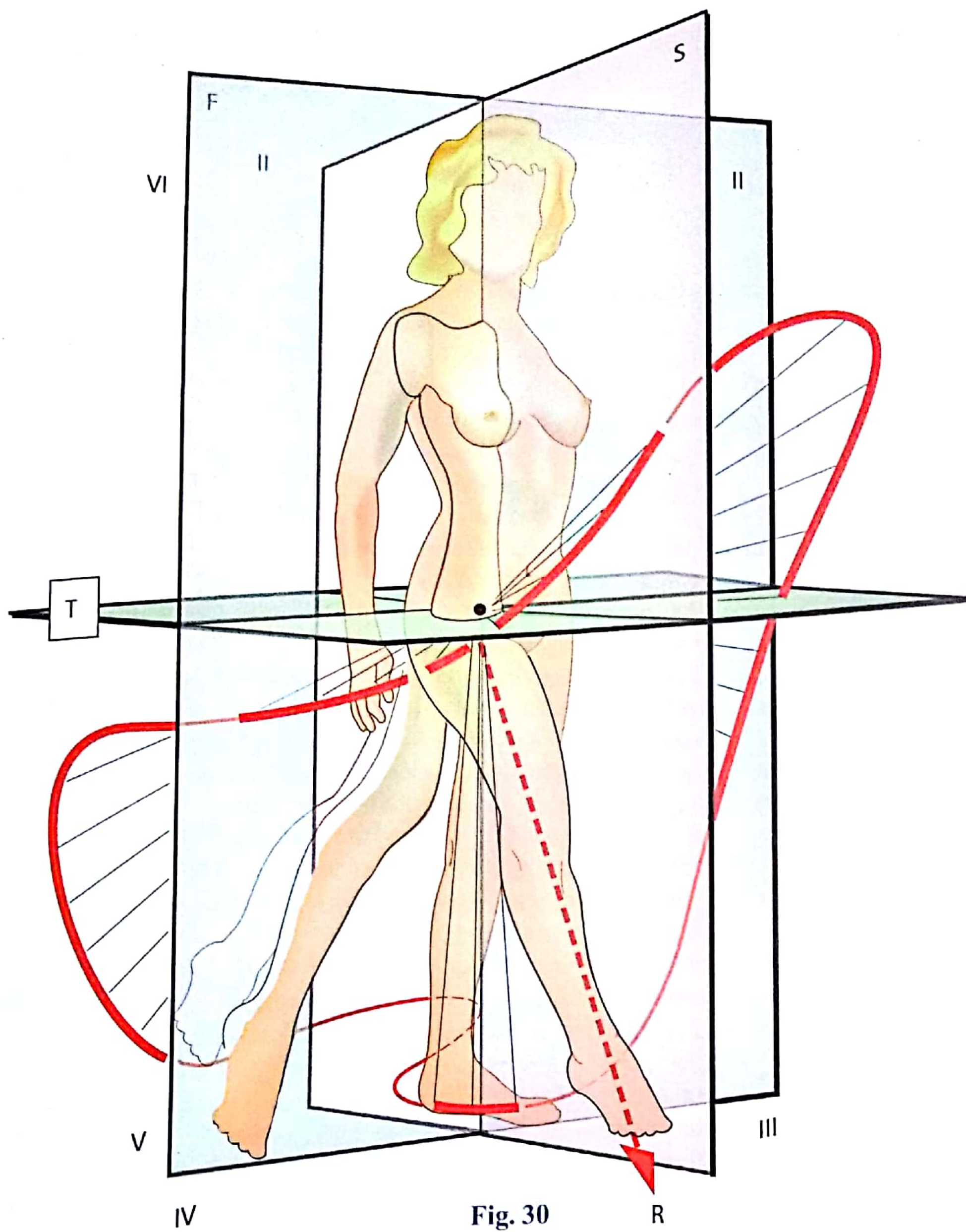


Fig. 30

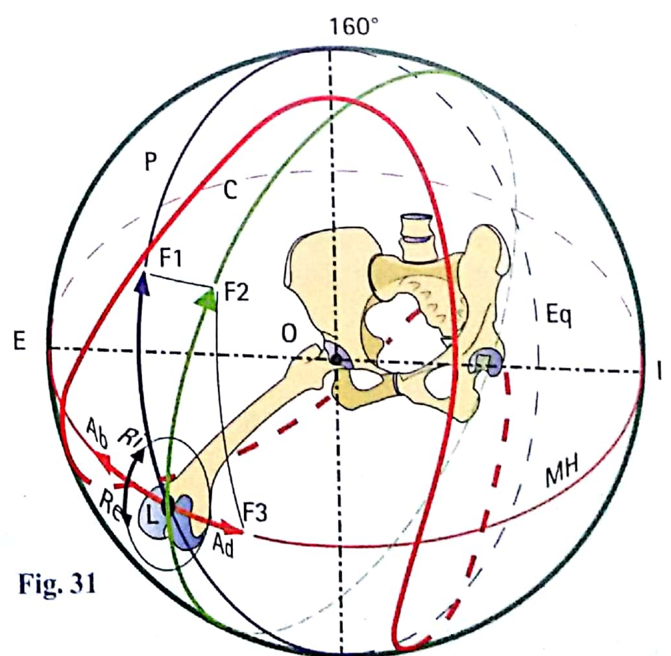


Fig. 31

Orientation de la tête fémorale et de l'acétabulum

L'articulation coxo-fémorale est une **énarthrose** : ses surfaces articulaires sont *sphériques*.

La tête fémorale

La **tête fémorale (Fig. 32 : vue antérieure)** est constituée par les deux tiers d'une sphère de 40 à 50 mm de diamètre. Par son centre géométrique **O** passent les trois axes de l'articulation : axe horizontal **1**, axe vertical **2** et axe antéro-postérieur **3**.

La tête fémorale est supportée par le **col fémoral** qui assure la jonction avec la diaphyse. L'axe du col fémoral **(flèche A)** est oblique en haut, en dedans et en avant ; il forme ainsi avec l'axe diaphysaire **D** un angle dit d'*inclinaison* de 125° chez l'adulte. Avec le plan frontal **(Fig. 38 : vue supérieure)**, il forme un angle dit de *déclinaison* de 10 à 30° ouvert en dedans et en avant : on l'appelle aussi *angle d'antéversion*. De la sorte **(Fig. 35 : vue postéro-interne)**, le plan vertico-frontal passant par le centre de la tête fémorale et l'axe des condyles **(plan P)** laisse presque entièrement derrière lui la diaphyse fémorale et son extrémité supérieure ; ce **plan P** contient l'**axe mécanique MM'** du membre inférieur, qui forme avec l'axe diaphysaire **D** un angle de 5 à 7° (voir p. 76).

La forme de la tête et du col est *très variable suivant les individus*, et les anthropologues ont constaté qu'elle répondait à une certaine adaptation fonctionnelle. On distingue ainsi deux types extrêmes **(Fig. 36, d'après Paul Bellugue)** :

- un **type longiligne** chez lequel la tête représente plus des deux tiers d'une sphère, où les *angles cervico-diaphysaires sont maximum* (I = 125°, D = 25°). La diaphyse fémorale est fine et le pelvis petit et haut. Une telle morphologie favorise une grande amplitude articulaire et correspond à une *adaptation à la vitesse de la course* **(a et c)** ;
- un **type bréviligne** chez la tête dépasse à peine la demi-sphère et les *angles cervico-diaphysaires sont réduits* (I = 115°, D = 10°). La diaphyse est plus large et le pelvis massif et large. L'amplitude articulaire est moins grande, mais ce qu'elle perd en vitesse, l'articulation le retrouve en robustesse **(b et d)**. C'est une *morphologie de force*.

L'acétabulum

L'acétabulum **(Fig. 33 : vue externe)** située sur la *face externe de l'os iliaque* à la jonction de ses trois parties constitutives, reçoit la tête fémorale. Elle a la forme d'une demi-sphère limitée sur son pourtour par le limbus de l'acétabulum **L**. Seule la périphérie de l'acétabulum est encroûtée de cartilage : c'est le croissant articulaire **Ca**, interrompu à sa partie inférieure par la profonde incisure acétabulaire. La partie centrale de l'acétabulum est en retrait par rapport au croissant articulaire et n'entre donc pas en contact avec la tête fémorale : c'est l'*arrière-fond cotyloïdien* **Af**, qu'une mince lame osseuse sépare de la face endo-pelvienne de l'os iliaque **(Fig. 34 : os transparent)**. Le centre de l'acétabulum **O** est situé au croisement des deux diagonales **AP** et **ET** (**A** : tubercule axile, **P** : pubis, **E** : épine iliaque antéro-supérieure, **T** : tubérosité ischiatique). Nous verrons plus loin (p. 32) comment le labrum de l'acétabulum **La** vient s'appliquer sur le limbus de l'acétabulum.

L'acétabulum n'est pas orienté directement en dehors, mais regarde aussi *en bas et en avant* **(Fig. 38 : flèche A' matérialisant l'axe de l'acétabulum)**. Sur une **coupe verticale de l'acétabulum (Fig. 37)**, cette orientation vers le bas est bien visible : l'axe de l'acétabulum forme un angle de 30 à 40° avec l'horizontale ; ceci implique que la partie supérieure de l'acétabulum *déborde* la tête en dehors ; ce débord est mesuré par l'*angle de recouvrement* **W** qui, normalement, est de 30° (angle de Wiberg). C'est au niveau du toit de l'acétabulum que la pression de la tête est la plus forte et que le cartilage est le plus épais sur la tête et sur le croissant articulaire. Sur une **coupe horizontale (Fig. 37)** apparaît l'*orientation vers l'avant* : l'axe de l'acétabulum **A'** forme un angle de 30-40° avec le plan frontal. On distingue aussi l'*arrière-fond* **Af** en retrait sur le *croissant articulaire* **Ca** et le *labrum* **La** appliqué sur le limbus de l'acétabulum. Le *plan tangent* au limbus de l'acétabulum **P** est oblique en avant et en dedans.

Dans la pratique médicale, on peut réaliser ces deux types de coupes :

- pour la **coupe vertico-frontale**, à la tomo-radiographie, qui donne une image proche de la figure 36 ;
- pour les **deux coupes, horizontale et vertico-frontale**, à l'examen scannographique de la hanche, qui donne une image proche de la figure 38 et permet de mesurer l'angle d'antéversion de l'acétabulum et du col fémoral, ce qui est fort utile dans le *diagnostic des dysplasies de la hanche*.

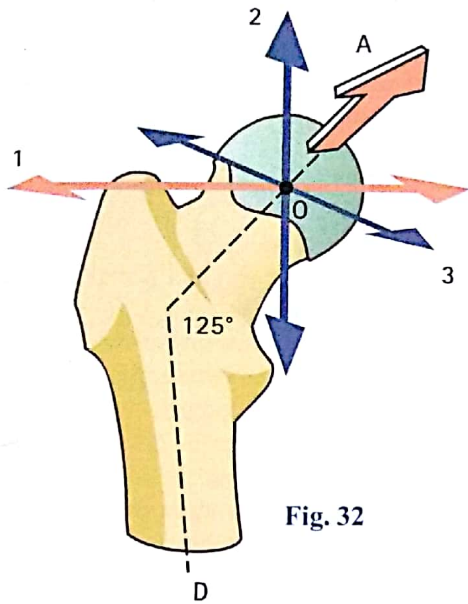


Fig. 32

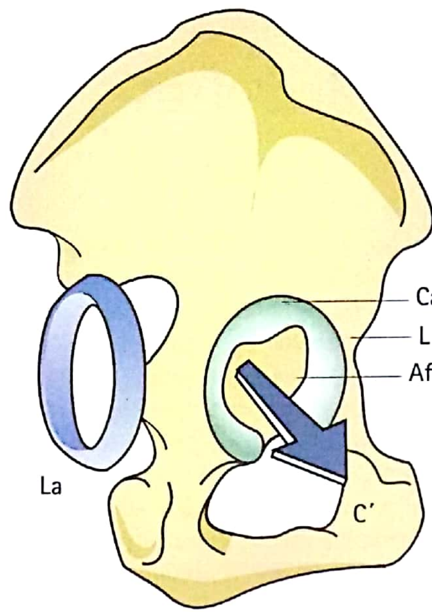


Fig. 33

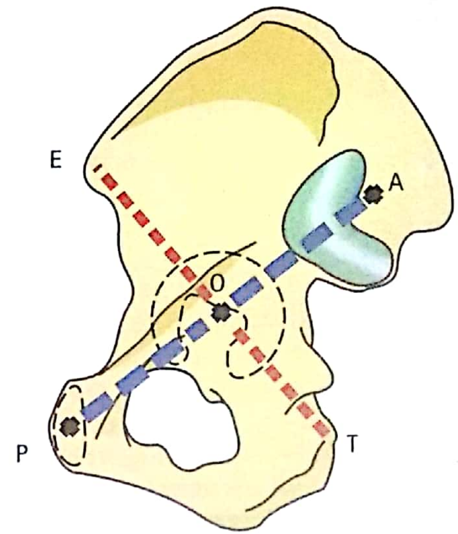


Fig. 34

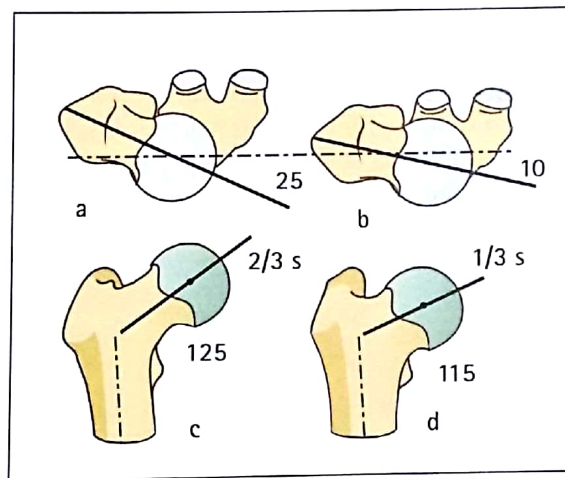


Fig. 36

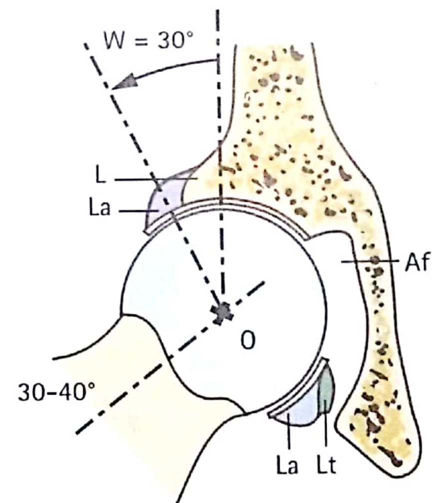


Fig. 37

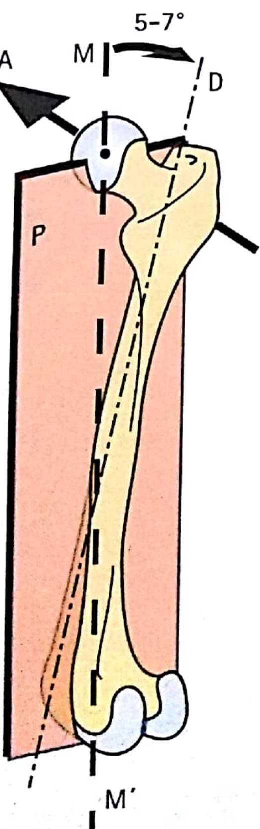


Fig. 35

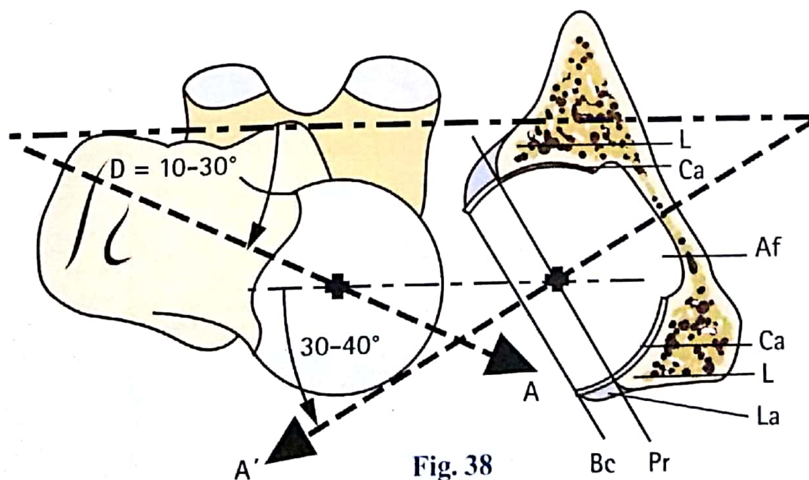


Fig. 38

Rapports des surfaces articulaires

Lorsque la hanche est en **rectitude (Fig. 39)**, ce qui correspond à la *station debout*, dite « érigée » **(Fig. 40)**, la tête fémorale n'est pas entièrement recouverte par l'acétabulum ; toute la partie antéro-supérieure de son cartilage est *à découvert* **(flèche blanche, Fig. 39)**. Ceci est dû au fait **(Fig. 45 : vue perspective des trois plans de référence de la hanche droite)** que l'*axe du col fémoral* **A**, oblique en haut, en avant et en dedans, n'est pas dans le prolongement de l'*axe de l'acétabulum* **A'**, oblique en bas, en avant et en dehors. On peut, grâce à un **modèle de l'articulation de la hanche (Fig. 41)** mettre en évidence une telle disposition : une sphère est supportée par une tige courbée suivant les angles d'inclinaison et de déclinaison ; le plan **D** matérialise le plan passant par l'axe diaphysaire et l'axe transversal des condyles. D'autre part, un hémisphère est convenablement orienté par rapport à un *plan sagittal* **S** ; un petit plan **F** représente le *plan frontal* passant par le centre de l'hémisphère. Dans la **position de rectitude**, la sphère est largement découverte en haut et en avant : le croissant gris foncé représente la partie du cartilage qui n'est pas couverte.

En faisant tourner d'une certaine manière l'hémisphère-acétabulum par rapport à la sphère-tête fémorale **(Fig. 44)**, on arrive à faire coïncider complètement les surfaces articulaires de la tête et de l'acétabulum : le croissant gris foncé a tout à fait disparu.

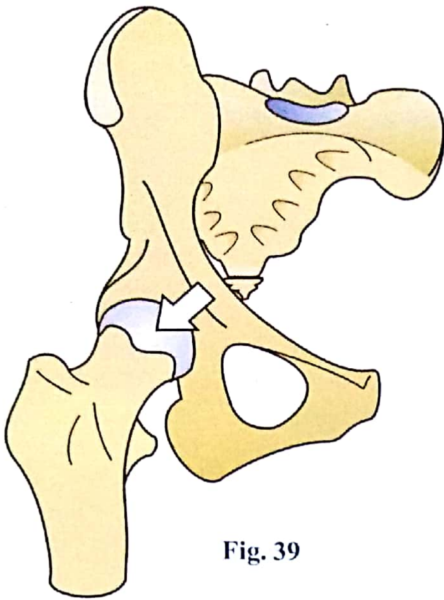
Grâce aux plans de références **S** et **F**, il est facile de constater que trois mouvements élémentaires ont été nécessaires pour réaliser la coïncidence des surfaces articulaires :

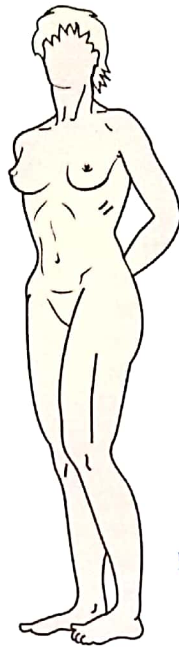
- une flexion voisine de 90° **(flèche 1)** ;
- une légère abduction **(flèche 2)** ;
- une légère rotation externe **(flèche 3)**.

Dans cette nouvelle position **(Fig. 46)**, l'axe de l'acétabulum **A'** est maintenant aligné en **A''** avec l'axe du col.

Sur le squelette **(Fig. 42)**, la coïncidence des surfaces articulaires peut être réalisée grâce aux mêmes mouvements de *flexion, abduction et rotation externe* : la tête est complètement *rentrée* dans l'acétabulum. Cette position de la hanche correspond à la **station quadrupède (Fig. 43)** qui est donc la véritable position physiologique de la hanche. C'est la suite de l'évolution qui, ayant fait passer l'homme de la marche quadrupède à la **marche bipède**, est responsable de la *non-coïncidence des surfaces articulaires* de l'articulation coxo-fémorale. Inversement, cette non-coïncidence des surfaces articulaires peut être retenue comme un argument en faveur de l'origine quadrupède lointaine de l'homme.

Cette position de non-coïncidence permanente en position debout à la suite du **passage à la bipédie** peut être invoquée comme étant à l'origine des dégradations arthrosiques de la hanche, surtout lorsqu'elle est favorisée par des *troubles d'orientation des surfaces articulaires*, dans le cadre des **dysplasies de hanche**.


Fig. 39


Fig. 40

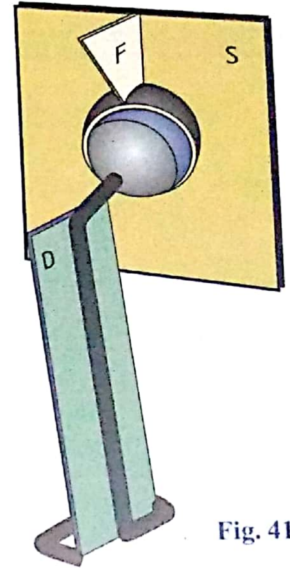
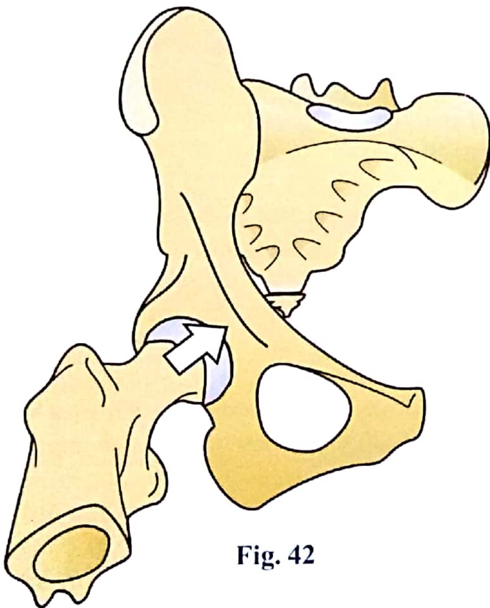
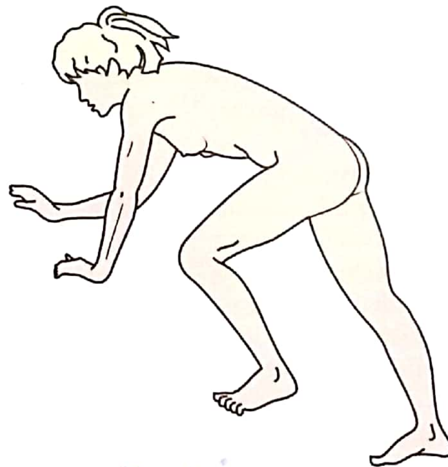


Fig. 41


Fig. 42


Fig. 43

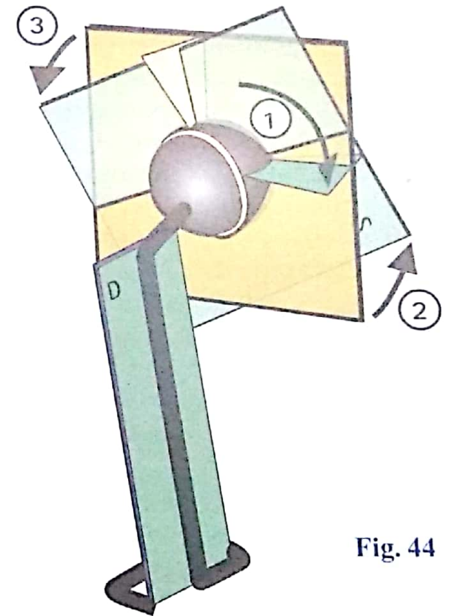


Fig. 44

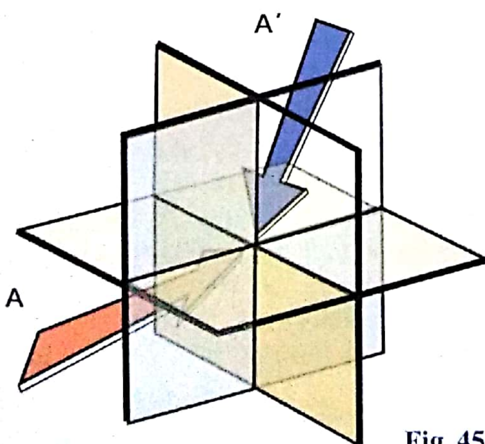


Fig. 45

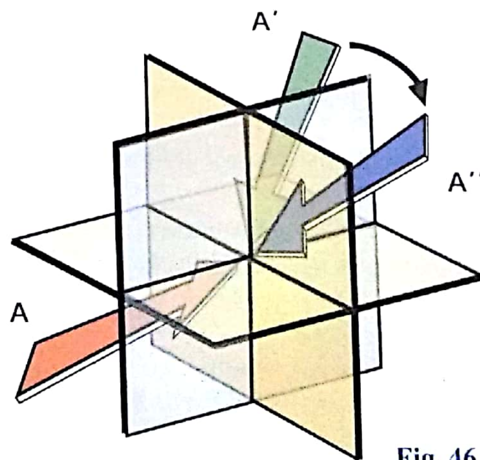


Fig. 46

Architecture du fémur et du pelvis

L'ensemble tête, col et diaphyse du fémur réalise ce qu'on appelle en mécanique un **porte-à-faux**. En effet, le poids du corps appliqué sur la tête fémorale est transmis à la diaphyse fémorale par l'intermédiaire d'un bras de levier, le col fémoral. Le même système de porte-à-faux s'observe dans une **potence** **(Fig. 51)** où l'effort vertical tend à *cisailler* la barre horizontale au ras de sa jonction avec le mât et à *fermer l'angle* que forment ces deux pièces. Pour empêcher un tel accident, il suffit d'intercaler obliquement une *jambe de force*.

Le col du fémur constitue la barre supérieure de la potence et sur une *vue générale du squelette du membre inférieur* **(Fig. 49)**, on constate que l'axe mécanique **(gros tirets)**, sur lequel s'alignent les trois articulations de la hanche, du genou et de la cheville, laisse en dehors de lui la potence fémorale (notez aussi que l'axe mécanique ne coïncide pas avec la verticale **(en points-tirets)**. Nous verrons plus loin **(voir Fig. 129)** l'intérêt mécanique de cette disposition.

Pour éviter le cisaillement de la base du col du fémur **(Fig. 52)**, l'extrémité supérieure du fémur possède une structure bien visible sur une **coupe verticale** d'os sec **(Fig. 47)**. Les lamelles de l'os spongieux sont disposées en **deux systèmes de travées** qui correspondent à des *lignes de force mécaniques*, avec :

- un **système principal** formé par deux faisceaux de travées qui s'épanouissent dans le col et la tête ;
- un **premier faisceau 1**, qui prend naissance de la corticale externe de la diaphyse et se termine sur la partie inférieure de la corticale céphalique. C'est le *faisceau arciforme de Gallois et Bosquette* ;
- un **deuxième faisceau 2**, qui s'épanouit à partir de la corticale interne de la diaphyse et de la corticale inférieure du col et se dirige verticalement vers la partie supérieure de la corticale céphalique : c'est le *faisceau céphalique* ou *éventail de sustentation*.

Culmann a montré que si l'on charge excentriquement une éprouvette en forme de crosse ou de grue **(Fig. 50)**, on peut faire apparaître deux éventails de lignes de force : un *éventail oblique* sur la convexité, qui correspond à des efforts de *traction* et représente l'homologue du faisceau arciforme et un *éventail vertical* dans la concavité, qui correspond à des efforts de *pression* et représente le faisceau céphalique (jambe de force de la potence), avec :

- un **système accessoire** par deux faisceaux qui s'épanouissent dans le grand trochanter ;
- un **premier faisceau 3**, à partir de la corticale interne de la diaphyse : c'est le *faisceau trochantérien* ;
- un **deuxième faisceau 4**, beaucoup moins important, qui est formé de fibres verticales parallèles à la corticale externe du grand trochanter, c'est le *faisceau sous-cortical*.

Trois points doivent être notés.

- Dans le massif trochantérien se trouve constitué un *système ogival* par la convergence du faisceau arciforme **1** et du faisceau trochantérien **3**. L'entrecroisement de ces deux piliers forme une clé de voûte plus dense qui descend de la corticale supérieure du col. Le pilier interne est moins solide et s'affaiblit encore avec l'âge du fait de l'ostéoporose sénile.
- Dans le col et la tête se trouve constitué un *autre système ogival* par l'entrecroisement du faisceau arciforme **1** et de l'éventail de sustentation **2**. À l'intersection de ces deux faisceaux, une zone plus dense forme le noyau de la tête. Ce système cervico-céphalique s'appuie sur une zone extrêmement solide, l'**épaisse corticale inférieure du col** qui forme l'*éperon cervical inférieur de Merkel* **M** ou encore l'*arc d'Adams*. On le nomme aussi le **calcar**.
- Entre le système ogival du massif trochantérien et le système de sustentation cervico-céphalique, il existe une **zone de moindre résistance**, que l'ostéoporose sénile rend encore plus fragile : c'est le siège des *fractures cervico-trochantériennes* **(Fig. 52)**.

La structure de la **ceinture pelvienne (Fig. 47)** peut aussi être étudiée de la même manière. Réalisant un anneau complètement fermé, elle transmet les efforts verticaux du rachis lombaire **(flèche rouge dédoublée)** vers les deux articulations coxo-fémorales.

Il existe *deux principaux systèmes trabéculaires* qui transmettent les efforts à partir de la facette auriculaire vers l'acétabulum d'une part et vers l'ischium d'autre part **(Fig. 47 et 48)**.

- Les travées sacro-cotylidiennes s'organisent en *deux systèmes* :
  - le premier système **5**, issu de la partie supérieure de la surface auriculaire, se condense sur le bord postérieur de l'échancrure sciatique, formant l'éperon sciatique **S**, sur lequel il se réfléchit pour s'épanouir sur la partie inférieure de l'acétabulum, où il se continue avec les travées de traction du col fémoral **1** ;
  - le second système **6**, issu de la partie inférieure de la surface auriculaire se condense au niveau du détroit supérieur – formant l'éperon innominé **I**, et s'y réfléchissant pour s'épanouir sur la partie supérieure de l'acétabulum où il se continue avec les travées de pression de l'éventail de sustentation **2**.
- Les travées sacro-ischiatiques **7** partent de la surface auriculaire avec les deux faisceaux précédents, puis descendent jusqu'à l'ischium. Elles s'entrecroisent avec des travées issues du limbus de l'acétabulum **8**. Ce système de travées ischiatiques supporte le poids du corps en position assise.
- Enfin, des travées issues de l'éperon innominé **I** et de l'éperon sciatique **S** s'engagent dans la branche horizontale du pubis, complétant ainsi l'anneau pelvien, renforcé par des travées sous-corticales **4**.

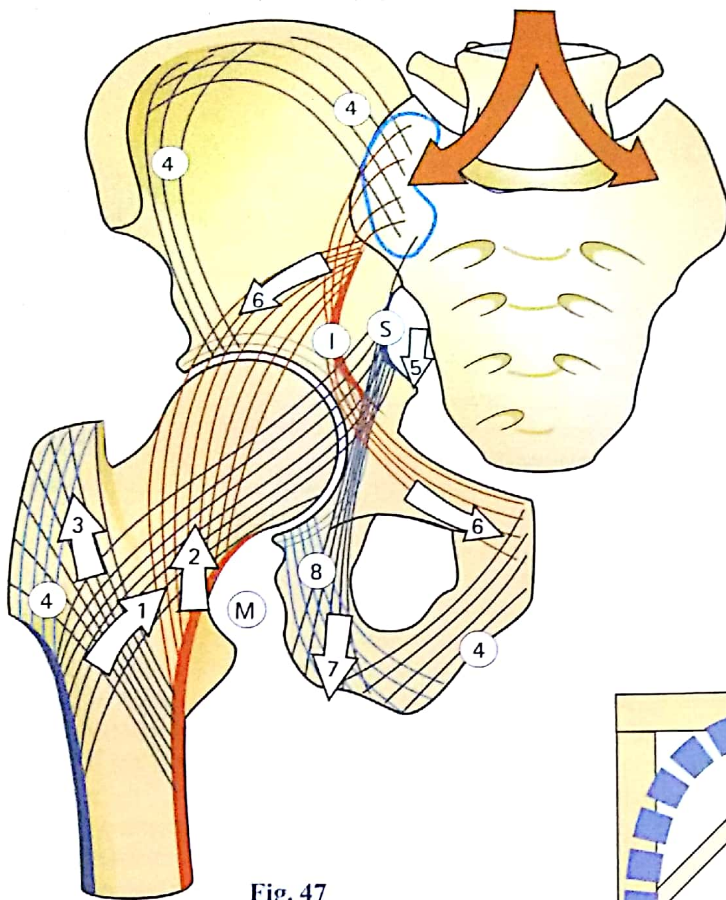


Fig. 47

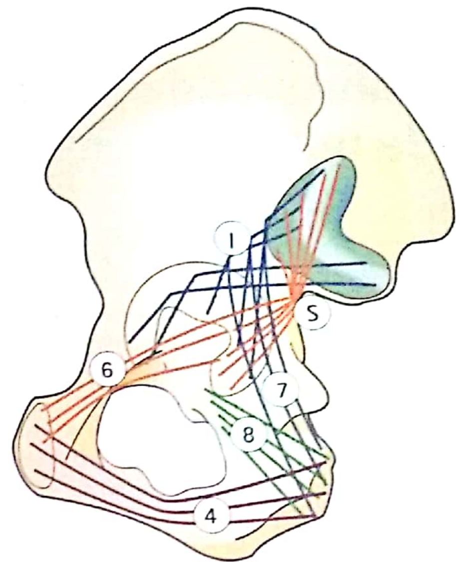
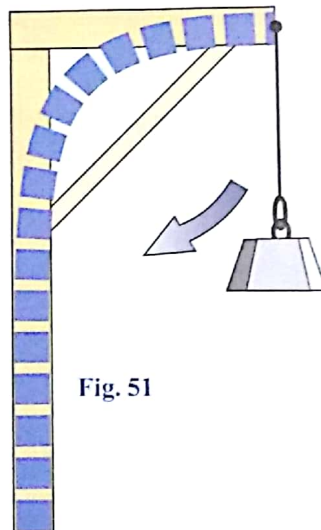
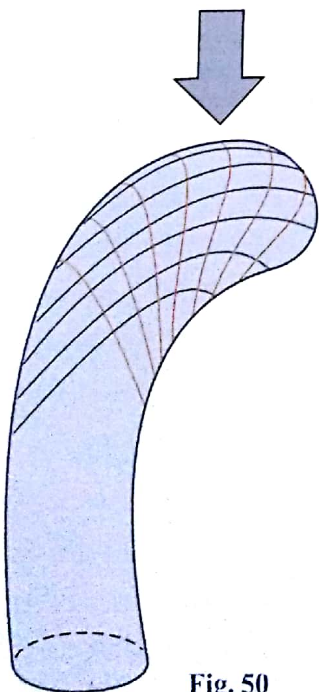
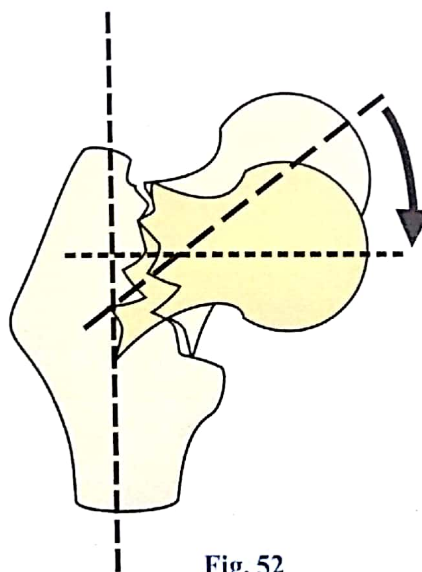
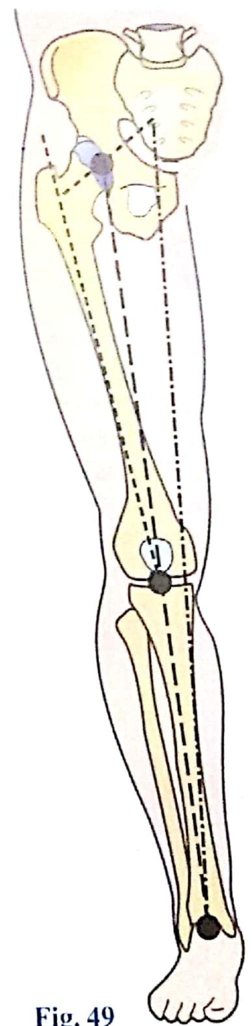


Fig. 48


Fig. 51


Fig. 50


Fig. 52


Fig. 49

Le labrum de l'acétabulum et le ligament de la tête fémorale

Le labrum de l'acétabulum **La** est un anneau fibro-cartilagineux inséré sur le **limbus de l'acétabulum (Fig. 53)** ; il accroît notablement la profondeur de la **cavité acétabulaire** (voir p. 44) et il comble les irrégularités du **limbus L** : la partie antéro-supérieure du labrum a été enlevée, ce qui laisse voir l'*échancrure ilio-pubienne* **EP**. Au niveau de l'*échancrure ischio-pubienne* **Eip**, la plus profonde des trois, le labrum passe en pont en s'insérant sur le **ligament transverse** de l'acétabulum **LT** fixé lui-même sur les deux berges de l'échancrure : sur le schéma on a *démonté* LT et BC. Sur la **coupe vertico-frontale de la hanche (Fig. 54)**, le bourrelet apparaît bien fixé au rebord et au ligament transverse **(voir aussi Fig. 37)**.

Le bourrelet, en effet, est *triangulaire à la coupe* et présente à décrire trois faces : une face *interne* insérée en totalité sur le sourcil et le ligament transverse ; une face *centrale* (elle regarde vers le centre de l'articulation) encroûtée de cartilage en continuité avec celui du croissant articulaire, en contact, par conséquent, avec la tête fémorale ; une face périphérique sur laquelle vient se fixer la capsule articulaire **C** mais cette insertion capsulaire ne se fait que dans la partie la plus interne de cette face, laissant libre dans la cavité articulaire le bord tranchant du bourrelet ; ainsi se trouve délimité entre bourrelet et capsule un *récessus circulaire* (**Fig. 55** d'après Rouvière) le **récessus périlimbique R**.

Le **ligament de la tête fémorale ou anciennement ligament rond LR** est une bandelette fibreuse aplatie **(Fig. 57)**, longue de 30-35 mm, étendue de l'échancrure ischio-publienne **(Fig. 53)** à la tête fémorale et *logée dans l'arrière-fond de l'acétabulum* **(Fig. 54)**. Son insertion sur la tête fémorale **(Fig. 56)** se fait à la partie supérieure de la **fossette du ligament de la tête fémorale** creusée un peu au-dessous et en arrière du centre de la surface cartilagineuse ; sur la partie inférieure de la fossette, le ligament ne fait que glisser. La bandelette se divise bientôt en trois faisceaux :

- un *faisceau postérieur ischiatique* **fp**, le plus long qui va sortir par l'échancrure ischio-pubienne, en passant sous le ligament transverse **(Fig. 53)**, pour se fixer au-dessous et en arrière de la corne postérieure du croissant articulaire ;
- un *faisceau antérieur pubien* **fa** qui se fixe dans l'échancrure elle-même, en arrière de la corne antérieure du croissant articulaire ;
- un *faisceau moyen* **fm** plus mince qui se termine sur le bord supérieur du ligament transverse **(Fig. 53)**.

Le ligament de la tête fémoraleest contenu **(Fig. 54)** avec du tissu cellulo-graisseux dans l'arrière-cavité ou *arrière-fond* **AF** où il est recouvert par la synoviale **(Fig. 55)** ; cette membrane s'insère d'une part sur le bord central du croissant articulaire et sur le bord supérieur du ligament transverse, d'autre part sur la tête fémorale au pourtour de la fossette d'insertion de ligament rond. La synoviale a donc approximativement une forme tronc-conique, c'est pourquoi on appelle cette formation la **tente du ligament de la tête fémorale Ts**.

Le ligament de la tête fémorale ne joue pas un grand rôle mécanique, bien qu'il soit extrêmement résistant (charge de rupture = 45 kg) ; par contre, il contribue à la **vascularisation de la tête fémorale**. En effet (**Fig. 58** : vue inférieure d'après Rouvière), la branche postérieure de l'artère obturatrice **1** détache une artériole, l'*artère du ligament de la tête fémorale* **6** qui passe sous le ligament transverse et s'intègre dans l'épaisseur du ligament rond. La tête et le col sont vascularisés d'autre part grâce aux *artères capsulaires* **5** branches des *artères circonflexes antérieure* **3** et *postérieure* **4**, collatérales de l'*artère fémorale profonde* **2**. Une fracture transcervicale interrompant les artères capsulaires *réduit la vascularisation de la tête fémorale*, qui ne dépend plus alors que de l'artère du ligament rond.

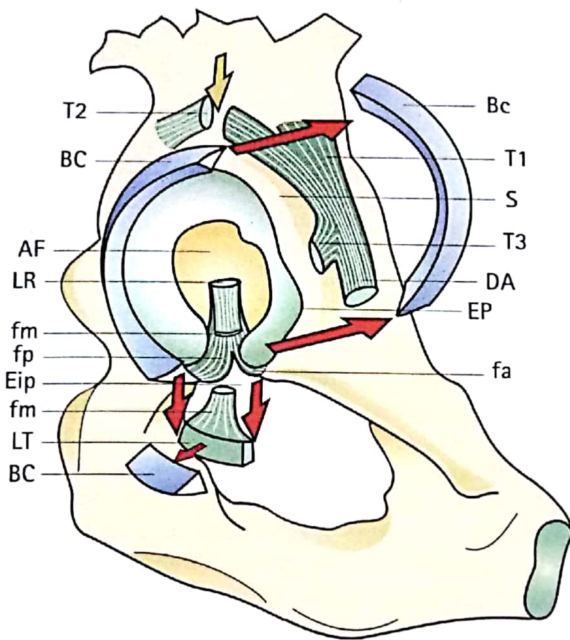


Fig. 53

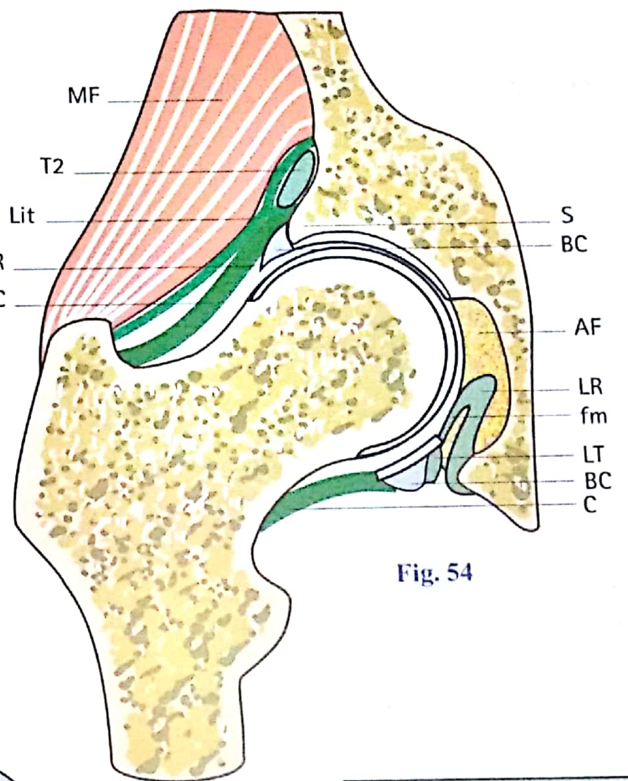


Fig. 54

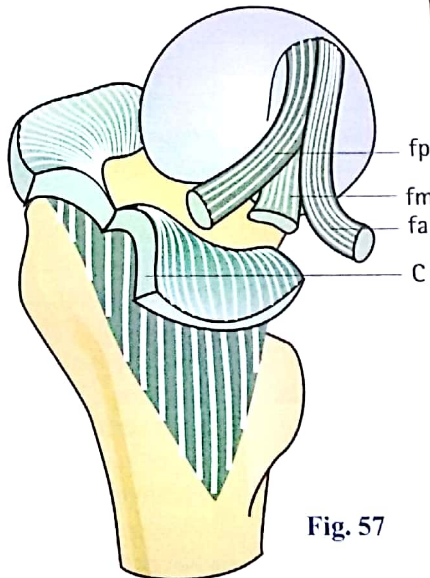


Fig. 57

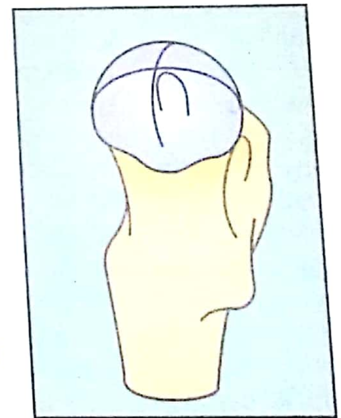


Fig. 56

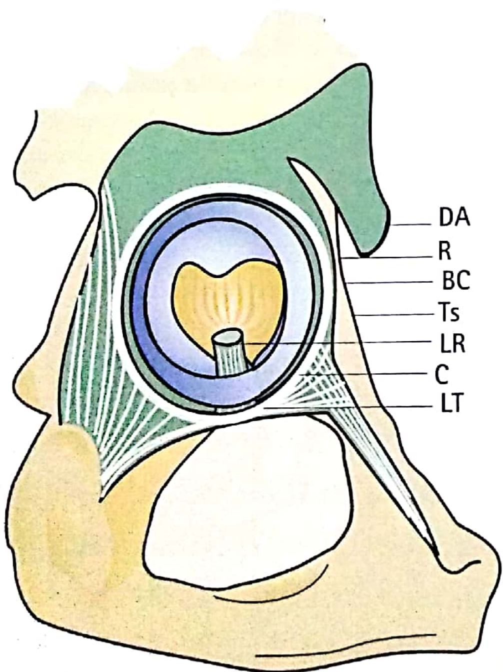


Fig. 55

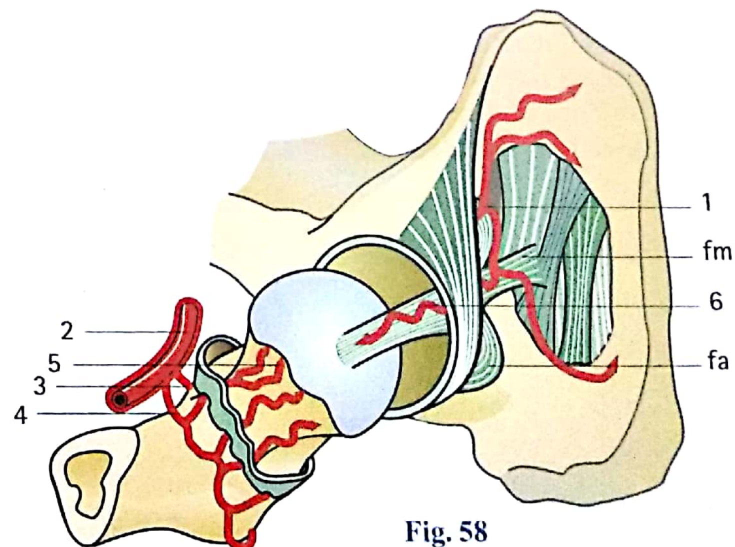


Fig. 58

La capsule articulaire de la hanche

La capsule de la hanche a la forme d'un **manchon cylindrique** **(Fig. 59)**, rétréci en diabolo, étendu entre l'os coxal et l'extrémité supérieure du fémur. Ce manchon est constitué par quatre types de fibres :

- des **fibres longitudinales 1**, unitives, parallèles à l'axe du cylindre ;
- des **fibres obliques 2**, unitives elles aussi, mais formant une spire autour du cylindre ;
- des **fibres arciformes 3**, ne prenant d'insertion que sur l'os coxal ; étendues en sautoir d'un point à un autre du limbus de l'acétabulum, elles forment un arc dont le sommet affleure le milieu du manchon. Ces arcs fibreux cravatent la tête fémorale et contribuent à la maintenir dans l'acétabulum ;
- des **fibres circulaires 4**, ne prenant aucune insertion osseuse. Elles sont surtout abondantes au milieu du manchon qu'elles rétrécissent légèrement. Elles font saillie à la face profonde de la capsule et forment l'*anneau de Weber* ou *zone orbiculaire*, qui enserre le col.

Par son extrémité interne, le manchon capsulaire se fixe sur le limbus de l'acétabulum **5**, sur le ligament transverse et sur la face périphérique du labrum (voir p. 32). Il contracte des rapports étroits avec le *tendon du muscle droit antérieur* **(DA, Fig. 53)** : son faisceau direct **T1** se fixe sur l'épine iliaque antéro-inférieure, son faisceau réfléchi **T2** se fixe à la partie postérieure de la gouttière sus-cotyloïdienne après s'être glissé dans un dédoublement de l'insertion capsulaire **(Fig. 54)** et du ligament ilio-tendino-prétrochantérien **Lit** qui renforce la partie supérieure de la capsule (voir p. 36) ; son faisceau récurrent **T3** renforce la partie antérieure de la capsule.

L'extrémité externe du manchon capsulaire ne s'insère pas à la limite du cartilage de la tête mais *à la base du col* suivant une ligne d'insertion qui passe :

- en avant **(Fig. 59)**, le long de la *ligne intertrochantérienne antérieure* **6** ;
- en arrière **(Fig. 60)**, non pas sur la ligne intertrochantérienne postérieure **7** mais à l'union du tiers externe et des deux tiers internes de la face postérieure du col **8**, juste au-dessus de la gouttière **9** que creuse le tendon du muscle obturateur externe avant de se fixer dans la fossette digitale **Fd** ;
- la ligne d'insertion *croise obliquement les bords supérieur et inférieur du col*. En bas **(Fig. 59)**, elle passe au-dessus de la *fossette prétrochantinienne* **10**, et 1,5 cm au-dessus et en avant du *petit trochanter* **Pt**. Les fibres les plus profondes remontent sur la partie inférieure du col pour se fixer à la limite du cartilage de la tête. Ce faisant, elles soulèvent des *replis synoviaux*, les **frenula capsulae 11**, le plus saillant d'entre eux constituant le *repli pectinéo-fovéal d'Amantini* **12**.

L'utilité de ces frenula capsulae apparaît bien *lors des mouvements d'abduction*. En effet, si **en adduction (Fig. 61)** la partie inférieure de la capsule **1** se détend alors que sa partie supérieure **2** se tend, lors de l'abduction **(Fig. 62)** la longueur de la partie inférieure de la capsule **1** serait insuffisante et limiterait le mouvement si les frenula capsulae **3**, *en se déroulant*, n'apportaient un jeu supplémentaire. On voit alors la capsule se plisser en haut **2** tandis que le col vient buter sur le limbus de l'acétabulum *par l'intermédiaire du labrum* **4** *qui se déforme et s'éverse* : on comprend ainsi comment le labrum augmente la profondeur de l'acétabulum *sans pour autant limiter le mouvement*.

Dans les mouvements de flexion extrême, la partie antéro-supérieure du col vient buter contre le limbus, ce qui chez certains sujets marque le col **(Fig. 59)** d'une empreinte iliaque **Ei** située juste au-dessous de la limite du cartilage.

En injectant un produit opaque dans la cavité articulaire, on peut obtenir radiologiquement une **arthrographie de la hanche** **(Fig. 63)** mettant en évidence certains détails de la capsule et du labrum : l'anneau de Weber ou *zone orbiculaire* **9** forme un rétrécissement très net qui divise la cavité articulaire en deux chambres : la *chambre externe* **1** et la *chambre interne* **2**. Ces deux chambres forment en haut les *récessus supérieurs* **3** et en bas les *récessus inférieurs* **4**. Sur la chambre interne viennent se brancher : en haut, comme un ergot dont la pointe acérée se dresse en direction du limbus de l'acétabulum, le *récessus sus-limbique* **5** (comparer avec la **figure 54**) ; en bas, se découpent deux presqu'îles arrondies séparées par un golfe profond : ce sont respectivement les *deux récessus acétabulaires* **6** et l'empreinte d'une partie du *ligament de la tête fémorale* **7**. Enfin, entre tête et acétabulum se dessine l'*interligne articulaire* **8**.

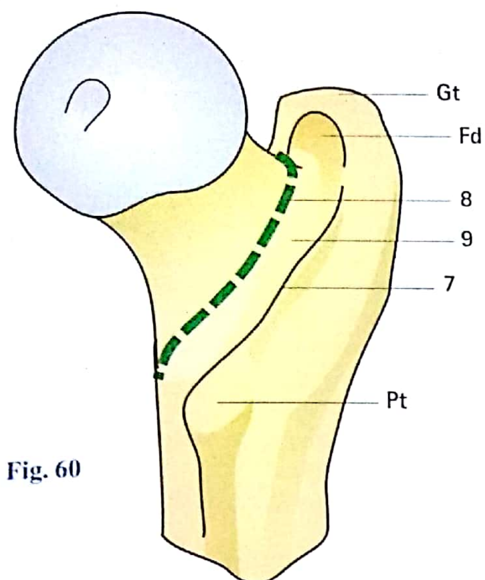


Fig. 60

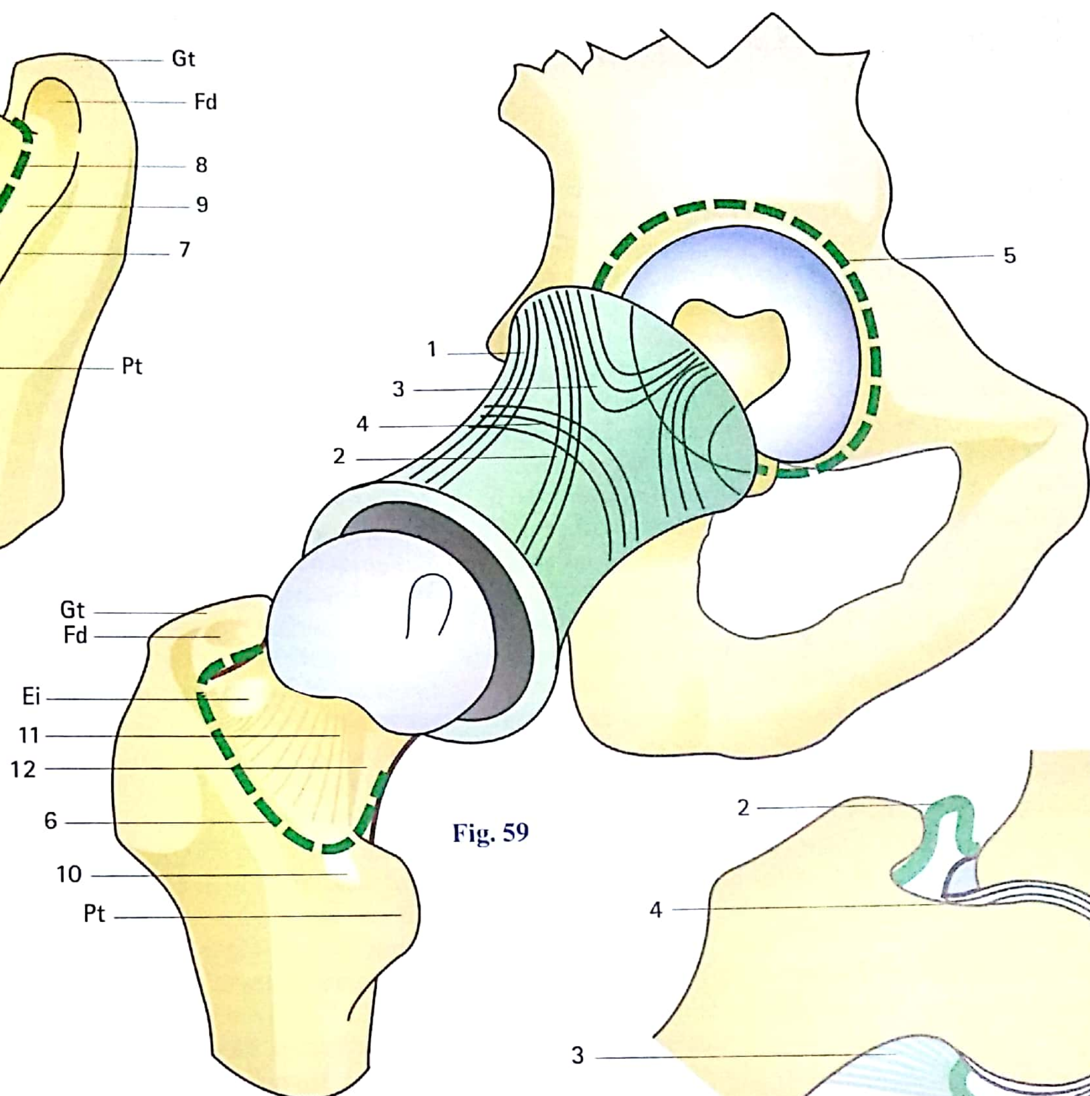


Fig. 59

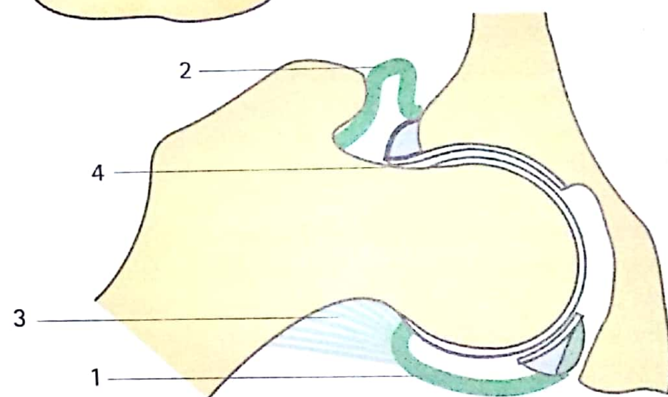


Fig. 62

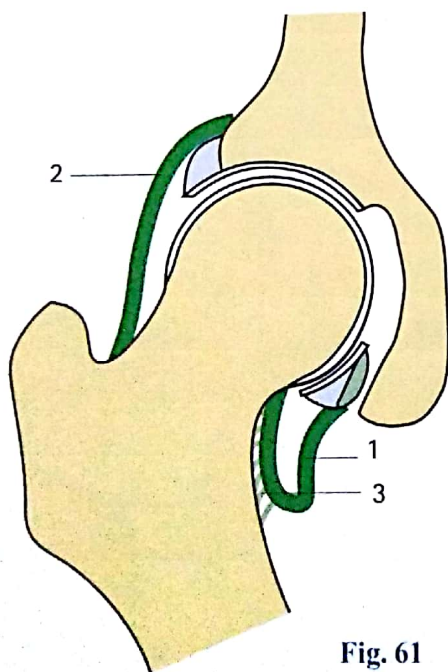


Fig. 61

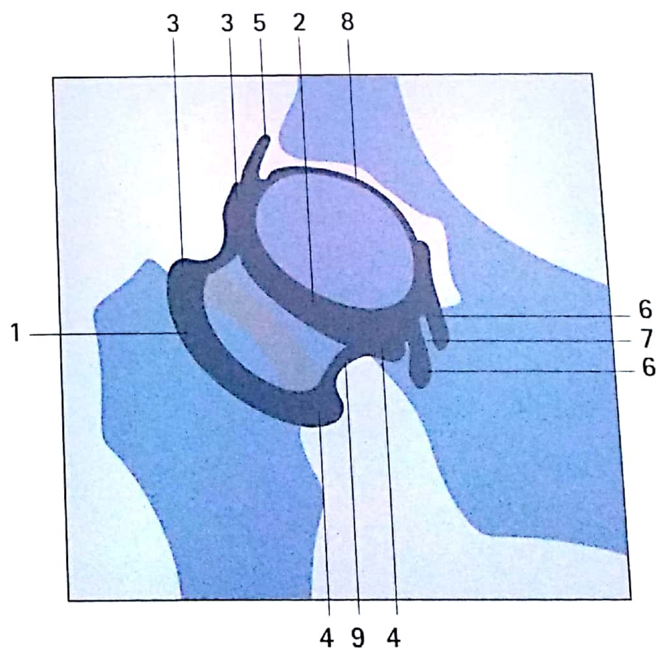


Fig. 63

Les ligaments de la hanche

La capsule de l'articulation coxo-fémorale est renforcée par de **puissants ligaments** sur ses faces antérieure et postérieure.
Sur la **face antérieure (Fig. 64)** se disposent deux ligaments :

- le **ligament ilio-fémoral 1a** et **1b**, éventail fibreux dont le sommet s'insère en haut sur le bord antérieur de l'os coxal au-dessous de l'*épine iliaque antéro-inférieure*, où s'attache aussi le muscle droit antérieur de la cuisse **DA**. Sa base s'attache au fémur sur toute l'étendue de la *ligne intertrochantérienne antérieure*. Cet éventail est mince à sa partie moyenne **1c**, alors que ses deux bords sont épaissis par :
  - le **faisceau supérieur** ou *ilio-prétrochantérien* **1a**, le plus fort des ligaments de l'articulation de 8 à 10 mm d'épaisseur, qui se termine en dehors sur le *tubercule prétrochantérien* et la partie supérieure de la ligne intertrochantérienne. Il est *renforcé* en haut par le *ligament ilio-tendino-trochantérien* **d** qui, d'après Rouvière, est formé par la fusion du *tendon récurrent du droit antérieur* **e** et d'une *lame fibreuse* naissant du limbus de l'acétabulum **f**. La *face profonde du petit fessier* **PF** détache une expansion aponévrotique **g** qui se fusionne avec la partie externe du ligament ilio-prétrochantérien,
  - le **faisceau inférieur** ou *ilio-prétrochantinien* **1b**, dont l'origine est confondue avec celle du précédent, s'insère en bas sur la *partie inférieure de la ligne intertrochantérienne antérieure* ;
- le **ligament pubo-fémoral 2** s'insère en haut sur la *partie antérieure de l'éminence ilio-pectinée* et la *lèvre antérieure de la gouttière sous-pubienne* où ses fibres se tissent avec l'insertion du muscle pectiné. En bas, il se fixe sur la *partie antérieure de la fossette prétrochantinienne*.

Sur un **schéma d'ensemble (Fig. 65)**, ces deux ligaments forment à la face antérieure de l'articulation un **N couché** (Welcker) ou mieux un **Z** dont le *jambage supérieur* **1a**, faisceau ilio-prétrochantérien, est presque horizontal, dont le *jambage moyen* **1b**, faisceau ilio-prétrochantinien est presque vertical. Le *jambage inférieur* **2**, ligament pubo-fémoral, est horizontal et complète le Z. Entre le ligament pubo-fémoral et le ligament ilio-fémoral, la capsule amincie répond à la bourse séreuse qui la sépare du *tendon du psoas-iliaque* **PI** ; parfois la capsule est perforée à ce niveau, ce qui fait communiquer la cavité articulaire *avec la bourse du psoas-iliaque*.

Sur la **face postérieure (Fig. 66)**, il n'existe qu'un seul ligament, le **ligament ischio-fémoral 3** : son insertion interne occupe la partie postérieure du limbus et du labrum de l'acétabulum ; ses fibres se portent en haut et en dehors, croisant la face postérieure du col **h** pour se fixer sur la face interne du grand trochanter *en avant de la fossette digitale* ; dans cette fossette se termine le muscle obturateur externe dont le tendon glisse **(flèche blanche)** dans une gouttière bordant l'insertion capsulaire. On distingue aussi **(Fig. 67)** des fibres **i** se jetant directement sur la *zone orbiculaire* **j**.

Du fait de l'extension du pelvis sur le fémur due au redressement de la station quadrupède à la station érigée (voir p. 28), tous les ligaments se sont trouvés **enroulés dans le même sens autour du col (Fig. 68)** : sur une hanche droite vue par dehors, leurs trajets tournent dans le sens des aiguilles d'une montre (en allant de l'os coxal au fémur), c'est-à-dire que **l'extension les enroule autour du col**, ce qui les tend et **la flexion les déroule**, ce qui les détend.

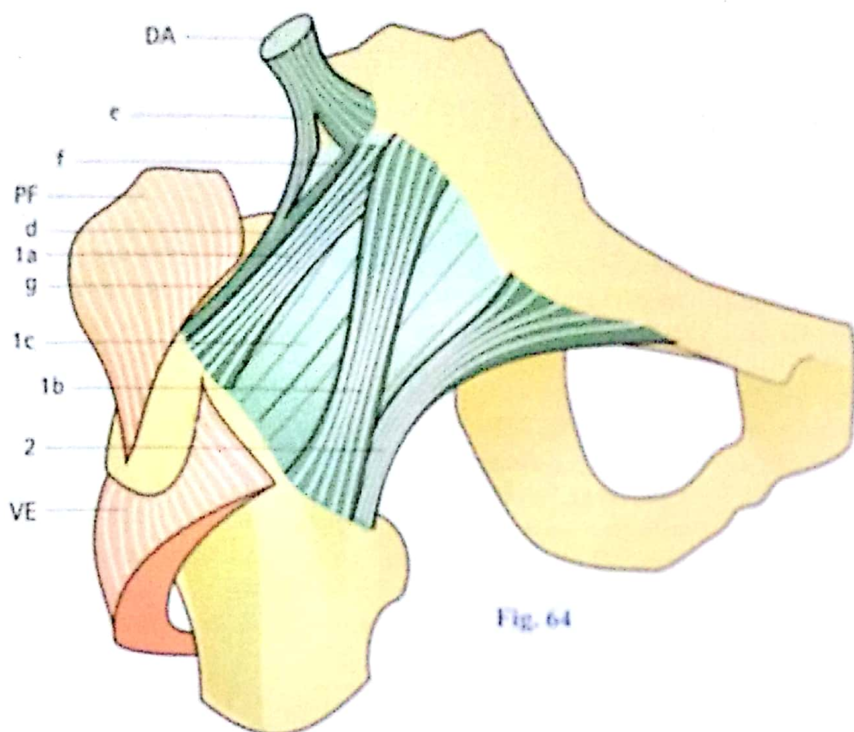


Fig. 64



Fig. 68

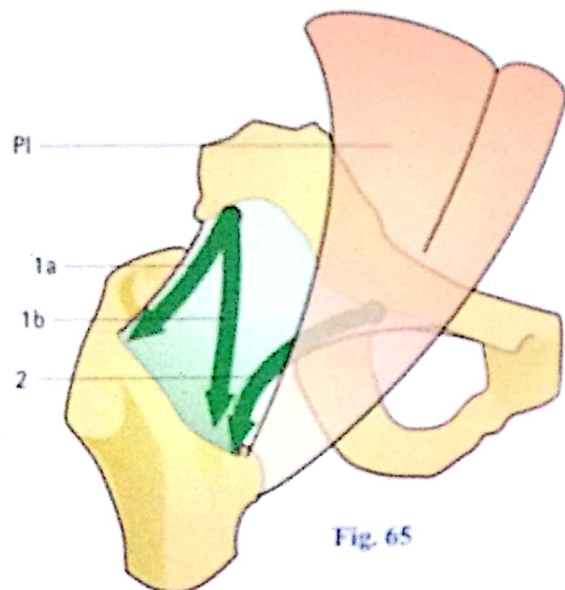


Fig. 65

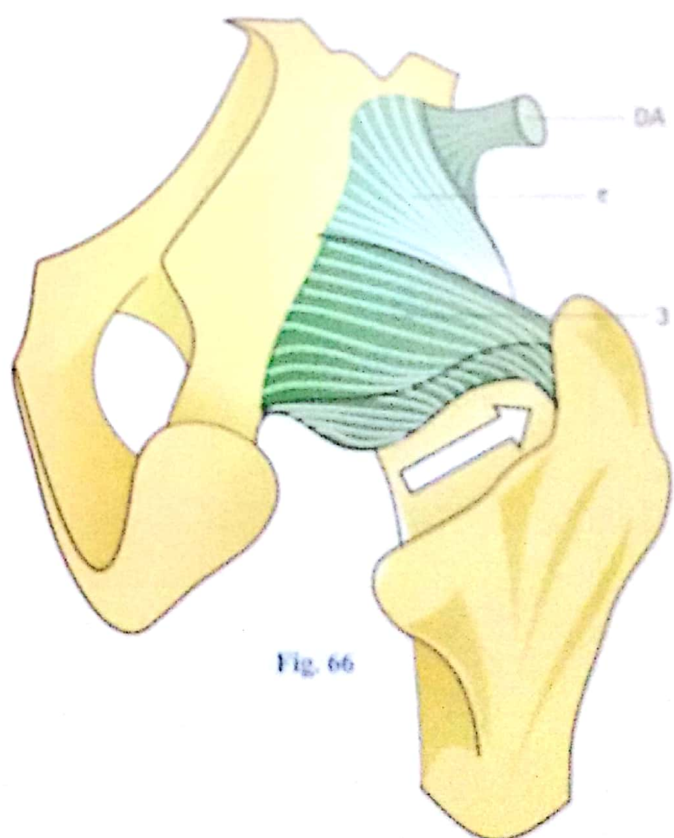


Fig. 66

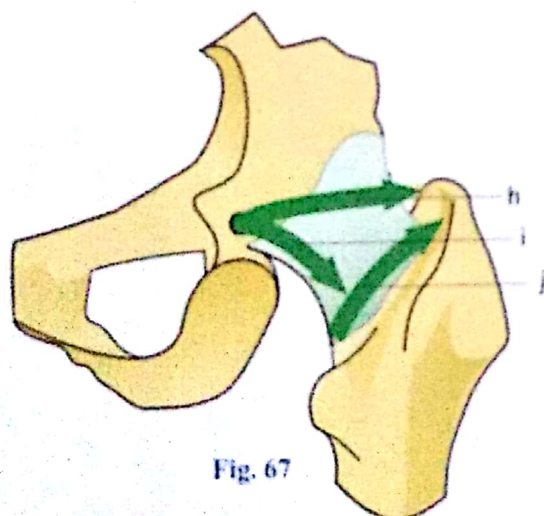


Fig. 67

Rôle des ligaments dans la flexion-extension

Dans la **position de rectitude (Fig. 69)**, les ligaments sont *modérément tendus*. Sur la figure, on distingue sous forme schématisée les deux faisceaux du ligament ilio-fémoral **IF** et le ligament pubo-fémoral **PF** ; le ligament ischio-fémoral, situé en arrière, n'est pas visible. Sur le diagramme **(Fig. 70)**, la couronne périphérique bleue représente l'acétabulum et le cercle central la tête et le col fémoraux : les ligaments, représentés par des ressorts, sont disposés entre la couronne et le cercle central et l'on reconnaît, en avant, le ligament ilio-fémoral **IF** et, en arrière, le ligament ischio-fémoral **IsF** (le ligament pubo-fémoral n'a pas été figuré pour alléger le dessin).

Lors de l'**extension de la hanche (Fig. 71 : l'os iliaque tourne en arrière en extension sur fémur fixe)**, *tous les ligaments se tendent* **(Fig. 72)** car ils s'enroulent autour du col fémoral. Cependant, parmi eux, c'est le faisceau ilio-prétrochantinien **Ip** du ligament ilio-fémoral qui se tend le plus, car il est presque vertical **(Fig. 71)** : c'est donc essentiellement lui qui *limite la bascule du pelvis vers l'arrière*.

Lors de la **flexion de la hanche (Fig. 73 : l'os iliaque bascule en avant en flexion sur fémur fixe)**, l'inverse se produit **(Fig. 74)** : tous les ligaments sont détendus, que ce soit l'ischio-, le pubo- ou l'ilio-fémoral. Ce relâchement des ligaments est un *facteur d'instabilité* de la hanche, dans cette position.

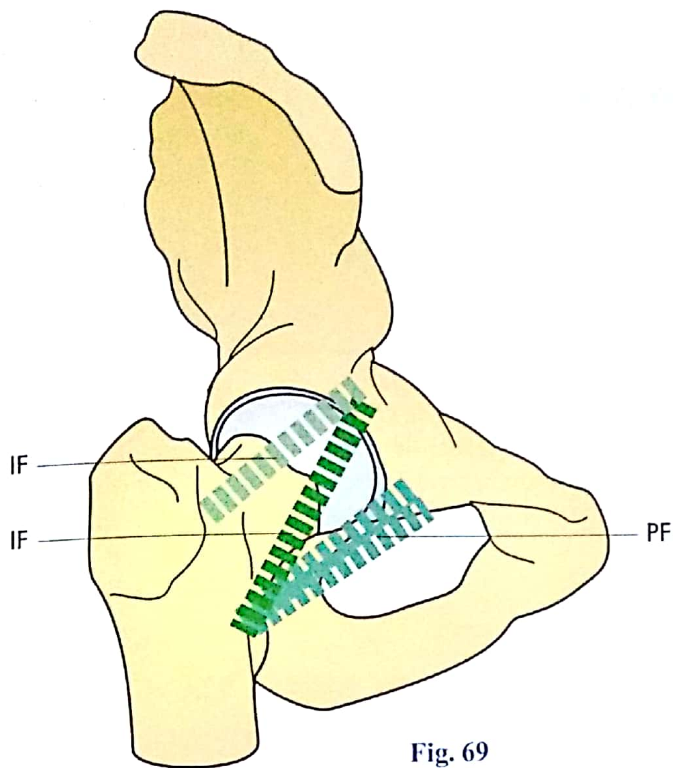


Fig. 69

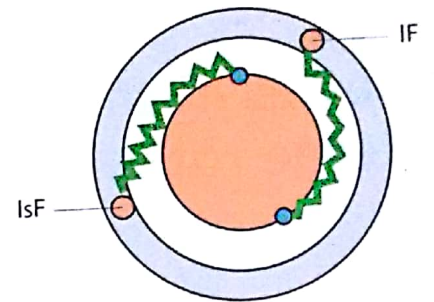


Fig. 70

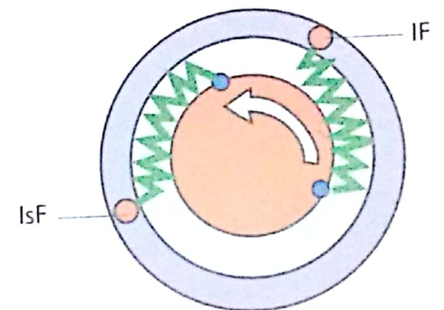


Fig. 74

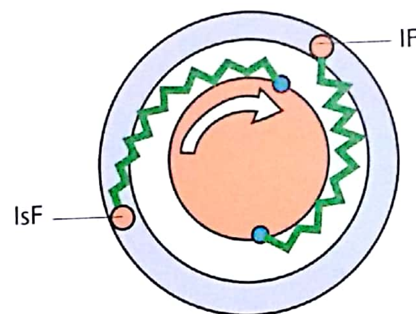


Fig. 72

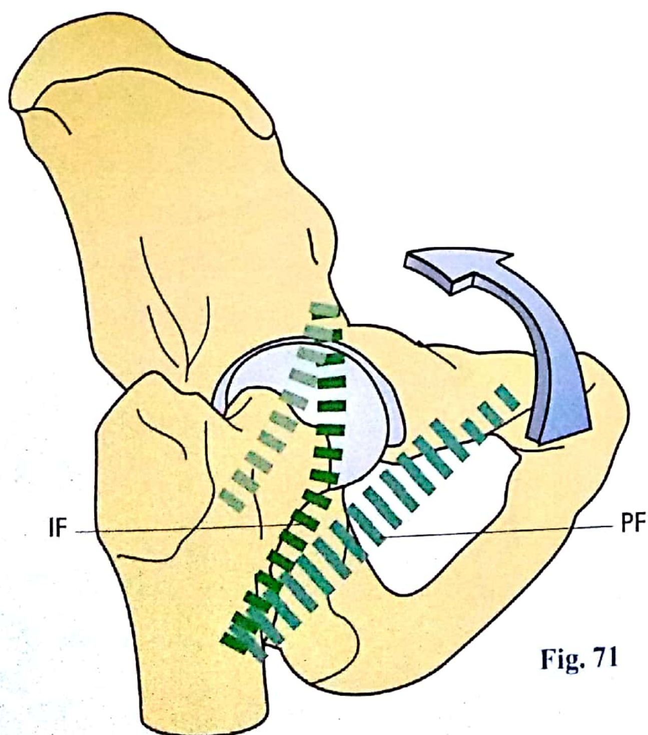
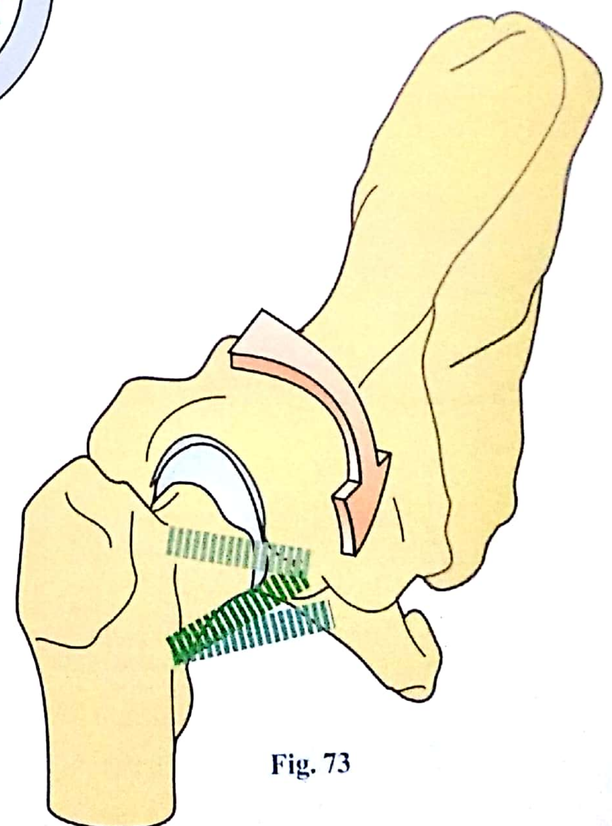


Fig. 71


Fig. 73

Rôle des ligaments dans la rotation externe-rotation interne

Lorsque la hanche tourne en **rotation externe (Fig. 75)**, la ligne intertrochantérienne antérieure s'éloigne du limbus de l'acétabulum ; il s'ensuit que tous les ligaments antérieurs de la hanche se trouvent tendus et, naturellement, la tension est maximum au niveau des faisceaux à direction horizontale, c'est-à-dire le faisceau *ilio-prétochantérien* **IP** et le ligament *pubo-fémoral* **PF**. Cette mise en tension des ligaments antérieurs s'observe bien sur une **coupe horizontale vue par en haut (Fig. 76)** et sur une **vue postéro-supérieure** de l'articulation **(Fig. 77)** ; ces vues montrent en outre que lors de la rotation externe, le ligament ischio-fémoral est *détendu* **IsF**.

Lors de la **rotation interne (Fig. 78)**, l'inverse se produit : tous les ligaments antérieurs se détendent et particulièrement le faisceau *ilio-prétrochantérien* **IP** et le ligament pubo-fémoral **PF**, tandis que le ligament ischio-fémoral **IsF** se tend **(Fig. 79 et 80)**.

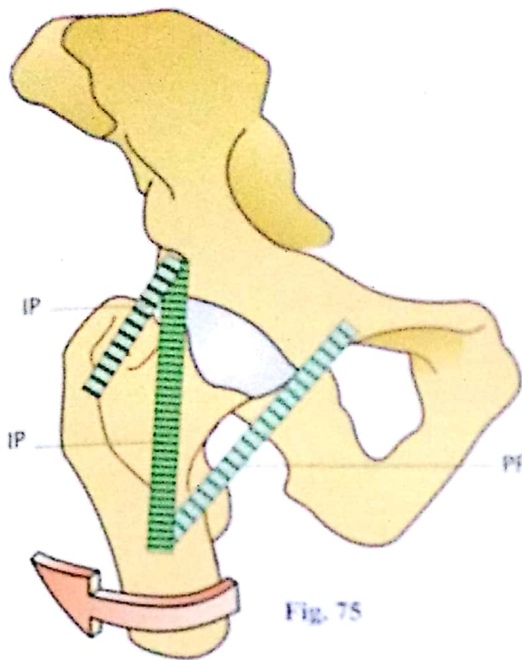


Fig. 75

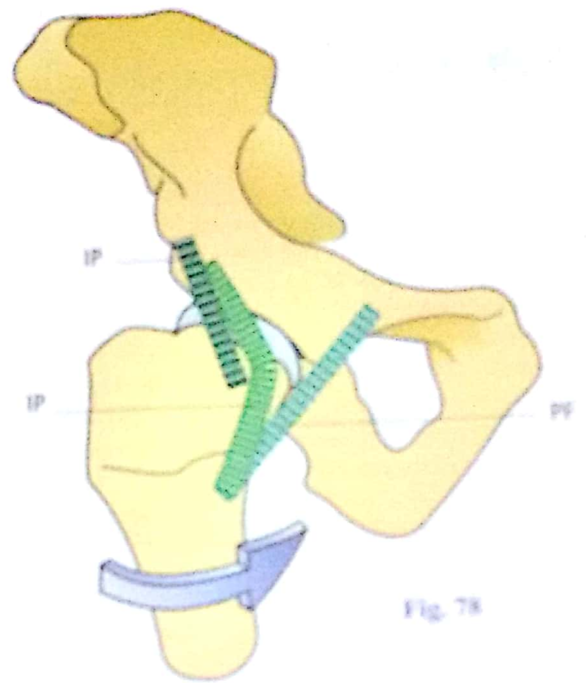


Fig. 78

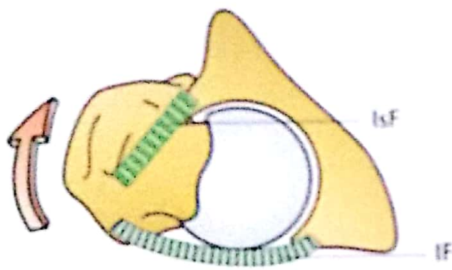


Fig. 76



Fig. 79

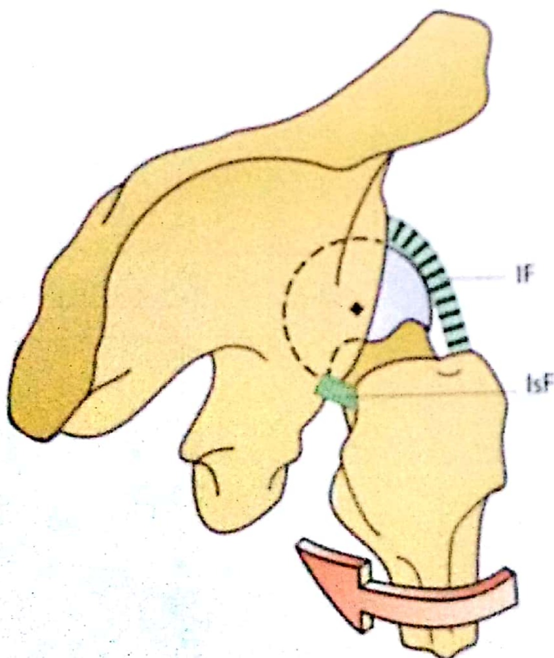


Fig. 77

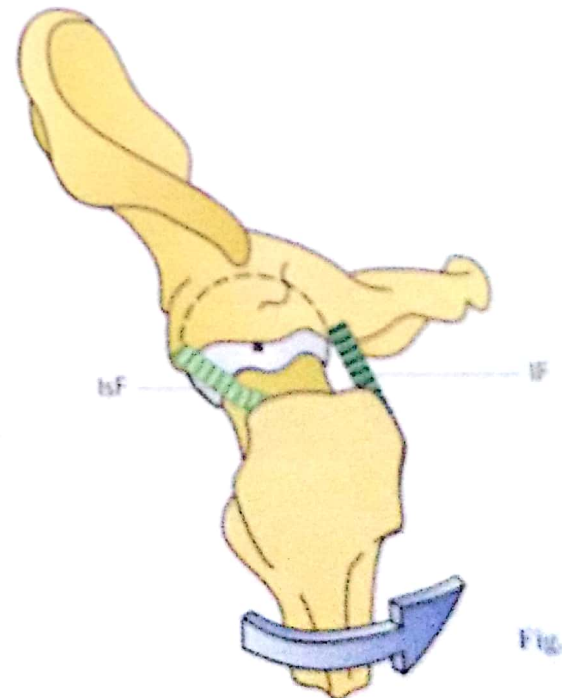


Fig. 80

Rôle des ligaments dans l'adduction-abduction

Partant de la **position de rectitude (Fig. 81)**, où les ligaments antérieurs, le ligament ilio-fémoral, avec ses deux faisceaux *ilio-prétrochantérien* **IP** et *ilio-prétrochantinien* **Ip**, et le *ligament pubo-fémoral* **PF**, sont modérément tendus, il est facile de constater que :

- lors des **mouvements d'adduction (Fig. 82)**, le faisceau ilio-prétrochantérien **IP** se tend et le ligament pubo-fémoral **PF** se détend. Quant au faisceau ilio-prétrochantinien **Ip**, il se tend légèrement ;
- lors des **mouvements d'abduction (Fig. 83)**, l'inverse se produit : le ligament pubo-fémoral **PF** se tend considérablement tandis que le faisceau ilio-prétrochantérien **IP** se détend, de même que le faisceau ilio-prétrochantinien **Ip** à un degré moindre.

Quant au ligament ischio-fémoral **IsF**, visible seulement sur une **vue postérieure**, il se tend lors de l'adduction **(Fig. 84)** et il se tend pendant l'abduction **(Fig. 85)**.

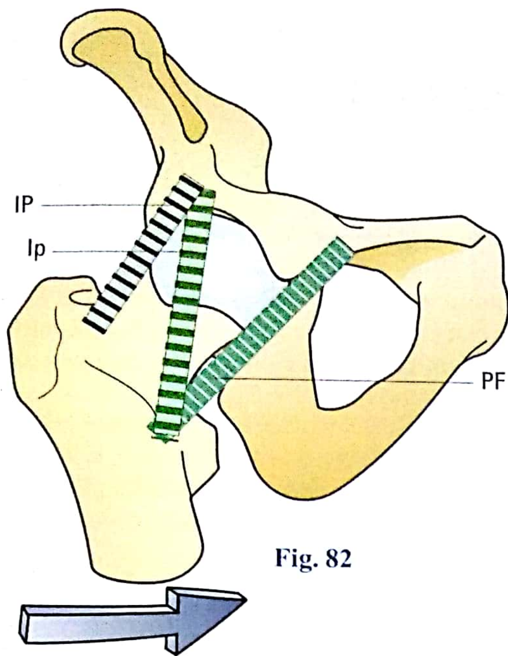


Fig. 82

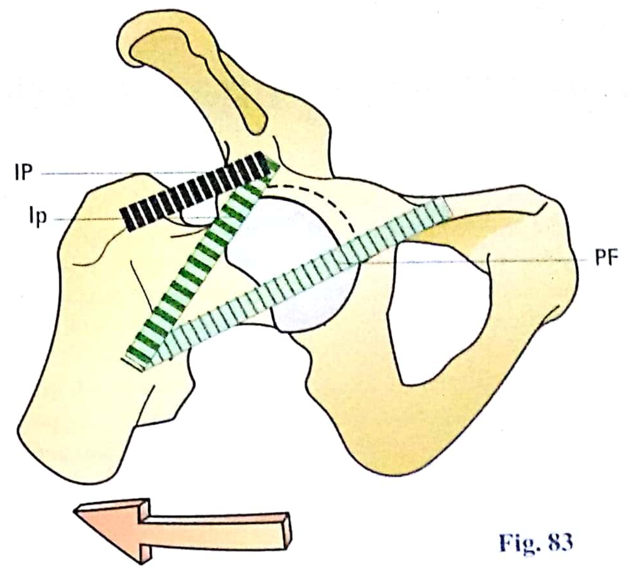


Fig. 83

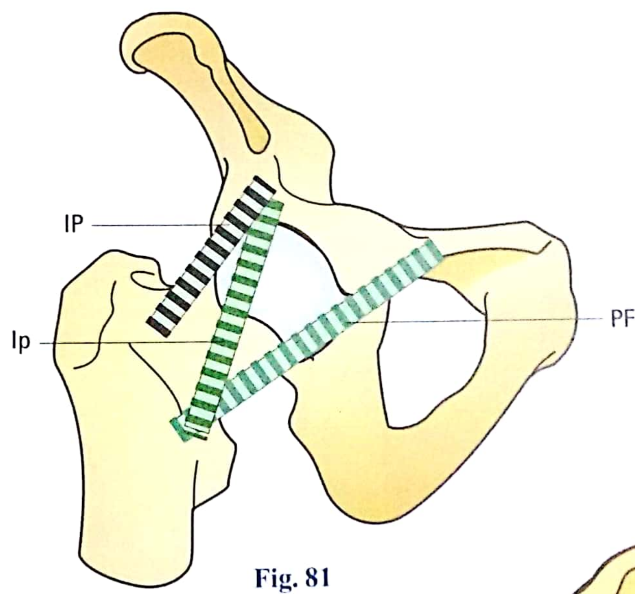


Fig. 81

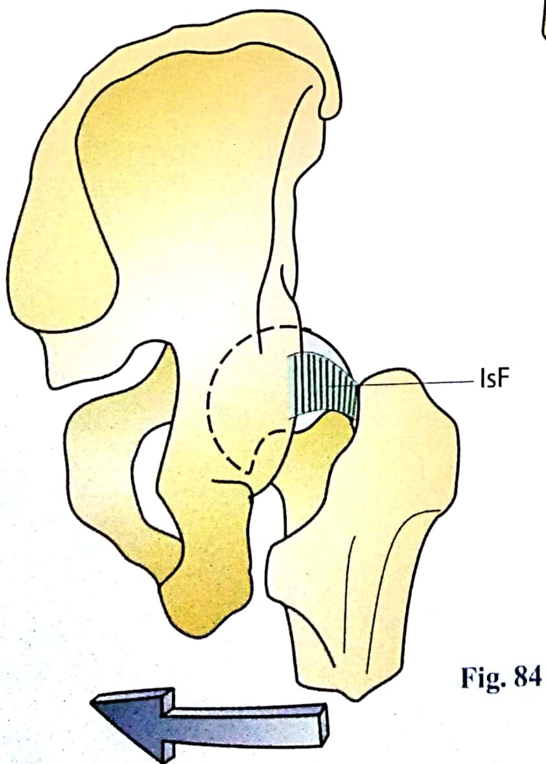


Fig. 84

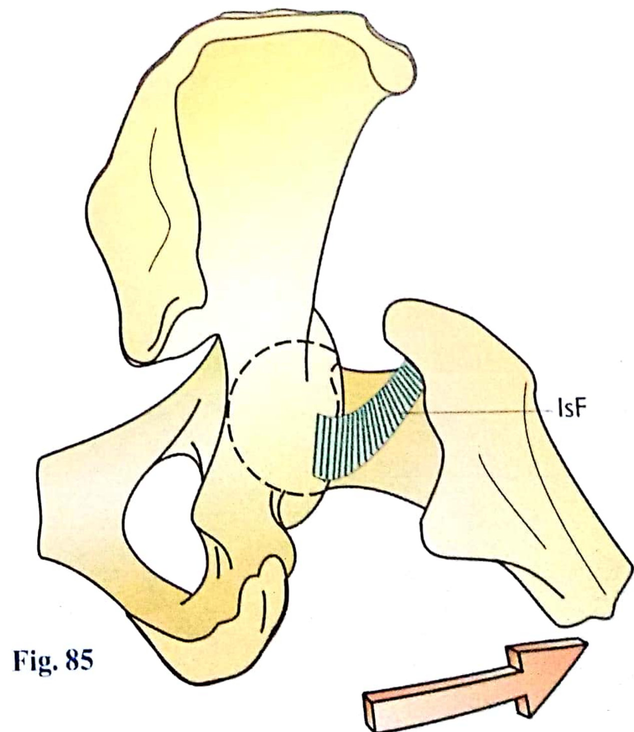


Fig. 85

Physiologie du ligament de la tête fémorale

Le ligament de la tête fémorale représente un *reliquat anatomique* et joue un rôle assez effacé dans la limitation des mouvements de la hanche. Il sert par contre de porte-vaisseaux car l'artère du ligament rond joue un rôle essentiel dans l'apport sanguin à la tête fémorale.

En **position de rectitude (Fig. 86 : coupe vertico-frontale)**, il est modérément tendu et son insertion fémorale occupe dans la fosse acétabulaire (**Fig. 87** : diagramme de la fosse acétabulaire avec les *diverses positions de la fovéa du ligament de la tête fémorale*) sa *position moyenne* **1** un peu au-dessous et en arrière du centre.

Lors de la **flexion de la hanche (Fig. 88)**, le ligament de la tête fémorale *se tord sur lui-même* et la fovéa **(Fig. 87)** vient se placer au-dessus et en avant du centre de la fosse acétabulaire **2**. Le ligament de la tête fémorale *n'intervient donc aucunement dans la limitation de la flexion*.

Lors de la **rotation interne (Fig. 89 : coupe horizontale, vue supérieure)**, la fovéa se déplace vers la partie postérieure et l'insertion fémorale du ligament vient au contact de la *partie postérieure du croissant articulaire* **3**. Le ligament reste modérément tendu.

Lors de la **rotation externe (Fig. 90)**, la fovéa migre vers l'avant et le ligament vient au contact de la *partie antérieure du croissant articulaire* **4**. Là encore, le ligament n'est que modérément tendu.

Au cours de l'**abduction (Fig. 91)**, la fovéa descend en direction de l'incisure acétabulaire **5** et le ligament se trouve *replié sur lui-même*. Le labrum est écrasé entre le bord supérieur du col et le limbus de l'acétabulum.

Notez la butée de la face postérieure du col sur le limbus de l'acétabulum, par l'intermédiaire du labrum *écrasé et éversé*.

Enfin, l'**adduction (Fig. 92)** déplace la fossette *vers le haut* **6** au contact de la limite supérieure de l'arrière-fond. C'est la seule position dans laquelle le ligament est vraiment tendu. La partie inférieure du col repousse légèrement le labrum et le ligament transverse.

Il apparaît ainsi que la fosse acétabulaire représente *le lieu de toutes les positions possibles de la fovéa du ligament* de la tête fémorale, y compris dans son incisure postérieure **7** et dans son incisure antérieure **8** : en effet, ce sont les positions occupées par la fovéa dans le mouvement d'*adduction extension-rotation interne* **7** et d'*adduction flexion-rotation externe* **8**. Entre ces deux incisures, l'avancée arrondie du cartilage *correspond à la position où l'adduction est la plus limitée,* dans le plan frontal par la butée de l'autre membre inférieur. Le contour interne du croissant articulaire n'est donc pas dû au hasard mais représente la *ligne des positions extrêmes* de la fovéa du ligament de la tête fémorale.

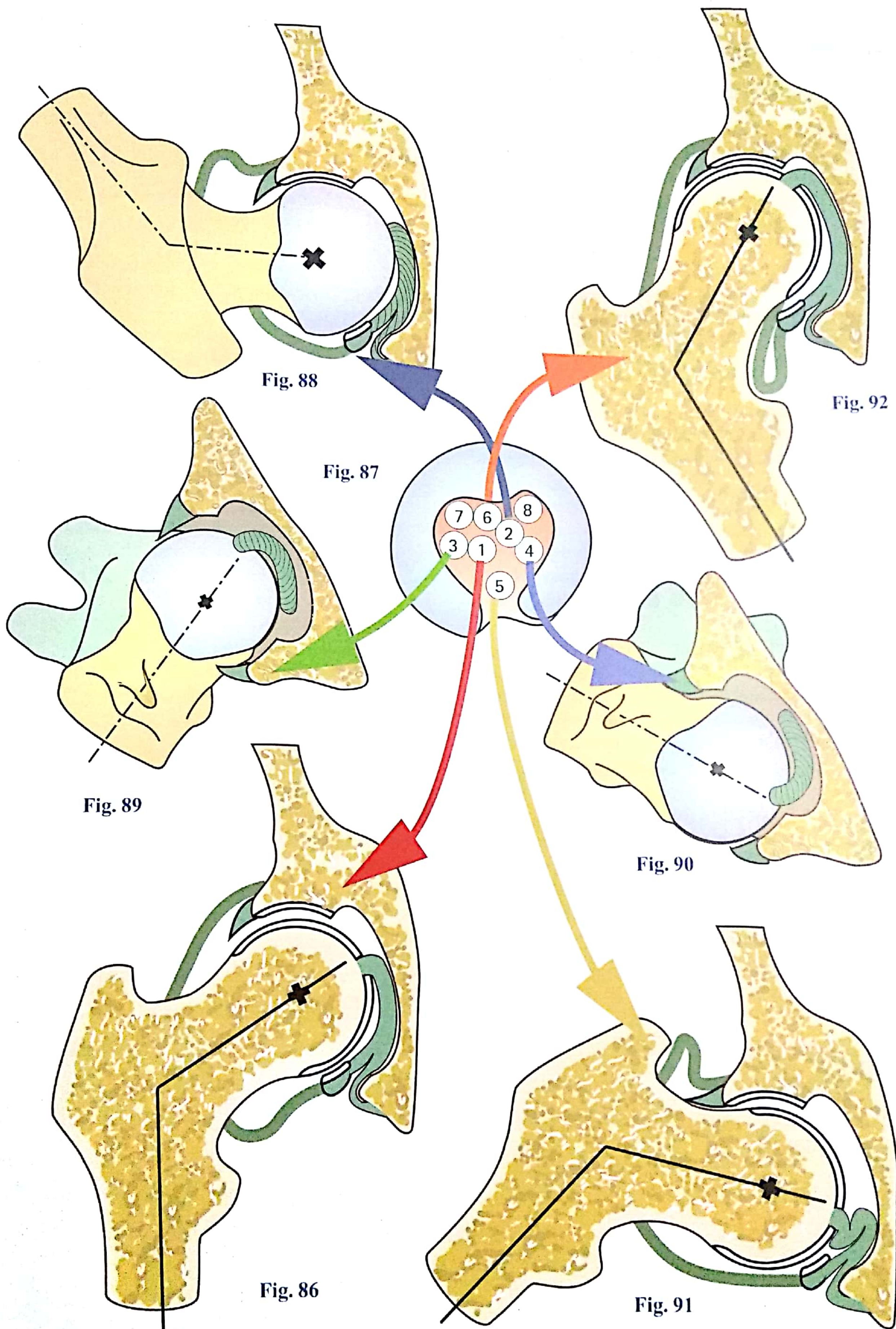


Fig. 88

Fig. 92

Fig. 87

Fig. 89

Fig. 90

Fig. 86

Fig. 91

Les facteurs de coaptation de l'articulation coxo-fémorale

À l'inverse de l'articulation scapulo-humérale que la pesanteur tend à disloquer, l'articulation de la hanche est aidée par la **pesanteur**, tout au moins dans la position de rectitude **(Fig. 93)** : dans la mesure où le toit de l'acétabulum recouvre suffisamment la tête fémorale, celle-ci se trouve appliquée dans l'acétabulum par la force de réaction **(flèche blanche ascendante)** qui s'oppose au poids du corps **(flèche blanche descendante)**.

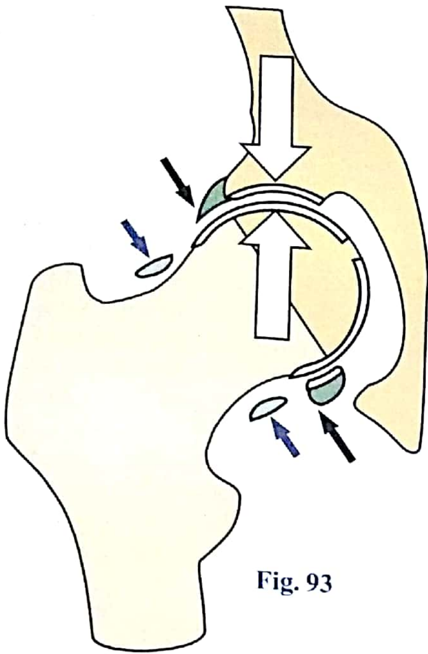
Nous savons que la cavité acétabulaire osseuse ne représente qu'une demi-sphère ; il n'existe donc pas ce qu'en mécanique on nomme un **couple d'emboîtement rétentif** : la sphère de la tête fémorale ne peut pas être mécaniquement retenue par l'hémisphère de l'acétabulum osseux, ce qui peut se constater aisément sur le squelette sec. Cependant le labrum de l'acétabulum prolonge la surface de l'acétabulum et l'approfondit, si bien que la cavité acétabulaire totale *dépasse la demi-sphère* **(flèches noires)**, ce qui crée un **couple d'emboîtement fibreux et rétentif** : le labrum retient la tête. Il est aidé en cela par la zone orbiculaire de la capsule dont la coupe **(petites flèches bleues)** enserre le col.

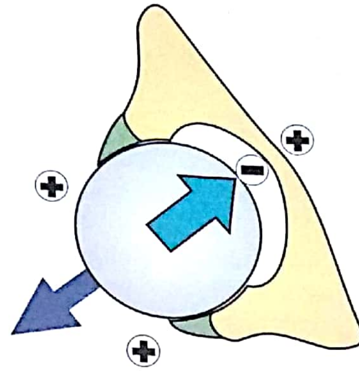
La **pression atmosphérique** est un facteur important de coaptation de la hanche comme l'a prouvé l'*expérience des frères Weber*. Ils ont constaté en effet que si l'on sectionnait toutes les parties molles reliant l'os coxal au fémur (capsule comprise), la tête fémorale ne sortait pas spontanément de l'acétabulum, et qu'il fallait même déployer une grande force **(Fig. 94)** pour arriver à l'extraire de son logement. Par contre **(Fig. 95)**, si l'on perçait un petit orifice dans le fond de l'acétabulum, la tête fémorale et le membre inférieur tombaient sous l'action de leur seul poids. La *contre-expérience* consistant à reboucher l'orifice après avoir réintégré la tête dans l'acétabulum montrait que, comme au début, la tête restait dans l'acétabulum. Cette expérience est tout à fait comparable à la très classique *expérience des hémisphères de Magdebourg* où il est impossible de séparer les hémisphères lorsqu'on a fait le vide à l'intérieur **(Fig. 96)**, alors qu'il devient très facile de les écarter lorsqu'on a laissé pénétrer l'air par un robinet **(Fig. 97)**, ce qui démontre parfaitement l'action de la pression atmosphérique.

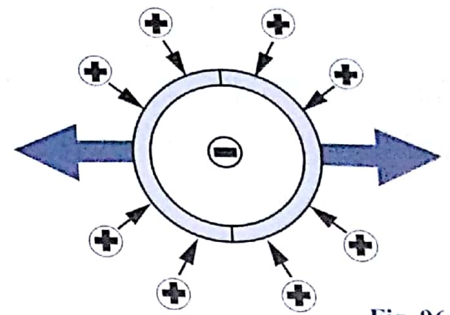
Les **ligaments et les muscles** jouent un rôle essentiel dans le maintien des surfaces articulaires. Il faut remarquer **(Fig. 98 : coupe horizontale)** qu'il existe un certain équilibre entre leur rôle respectif : en avant de l'articulation, les muscles **A** sont peu nombreux **(flèche bleue)** mais les ligaments sont puissants **(flèche noire)**, tandis qu'en arrière **B**, c'est l'inverse : les muscles **(flèche rouge)** sont prédominants. Leur action coordonnée applique la tête **(flèche verte)** dans l'acétabulum.

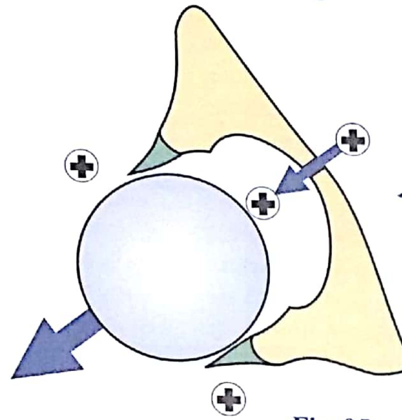
Il faut remarquer aussi que l'action des ligaments est différente **suivant la position de la hanche**. En **extension (Fig. 99)**, les ligaments sont tendus et la coaptation ligamentaire efficace. En **flexion** par contre **(Fig. 100)**, les ligaments sont détendus (voir p. 38) et la tête n'est plus appliquée aussi fortement dans l'acétabulum. Il est facile de comprendre ce mécanisme grâce à un modèle mécanique **(Fig. 101)** : entre deux cercles de bois glissant sur un axe commun sont tendus des fils parallèles **a** ; lorsqu'on fait tourner l'un des cercles par rapport à l'autre **b**, ils se rapprochent.

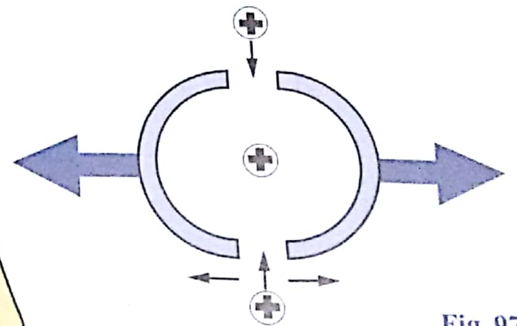
La position de flexion de la hanche est donc, du fait du relâchement ligamentaire, une **position d'instabilité** pour l'articulation. Lorsque s'y ajoute une adduction, comme dans la position assise jambes croisées **(Fig. 102)**, il suffit d'un choc relativement peu important dirigé dans l'axe du fémur **(flèche rouge)** pour créer une luxation postérieure de la hanche *avec ou sans fracture du rebord postérieur de l'acétabulum* : c'est le choc du tableau de bord dans les accidents de voiture.

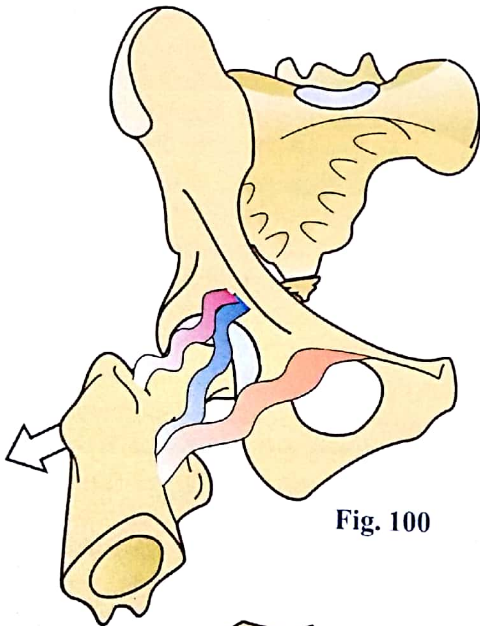

Fig. 93

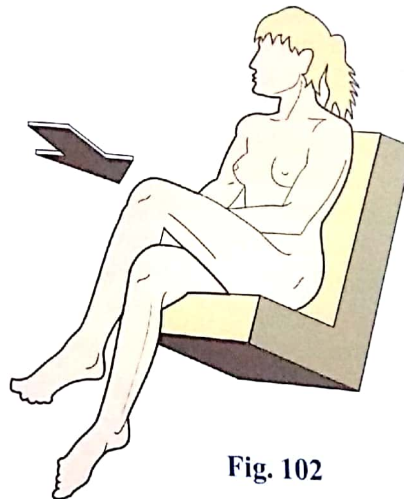

Fig. 94


Fig. 96


Fig. 95


Fig. 97


Fig. 100


Fig. 102

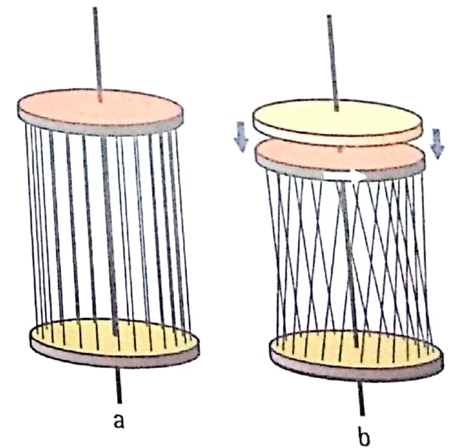
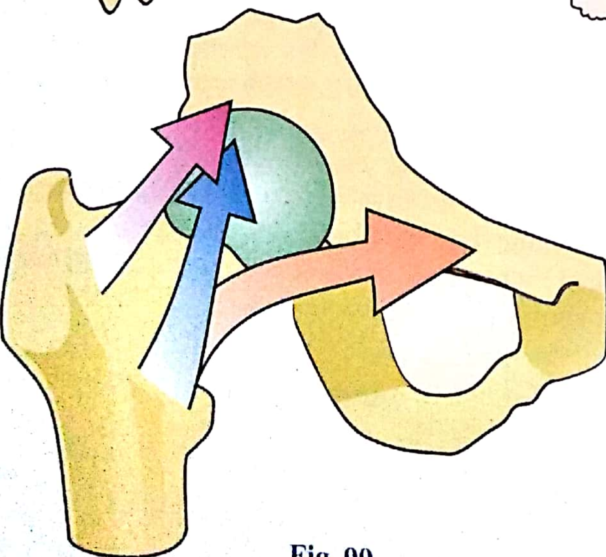
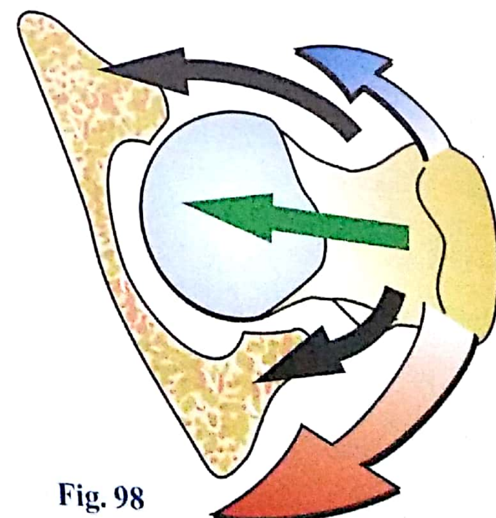


Fig. 101


Fig. 99


Fig. 98

Facteurs musculaires et osseux de la stabilité de la hanche

Les muscles jouent un **rôle essentiel dans la stabilité de la hanche**, à condition toutefois qu'ils aient une *direction transversale*. En effet **(Fig. 103)**, les muscles dont la direction est voisine de celle du col *appliquent la tête dans le cotyle* ; ceci est vrai pour les muscles pelvi-trochantériens ; ici sont figurés le muscle piriforme **1** et le muscle obturateur externe **2** ; cela est vrai aussi pour les muscles fessiers, surtout les muscles petit et moyen fessiers **3** dont la composante coaptrice **(flèche bleue)** est importante et qui, du fait de leur puissance, jouent un rôle de premier plan : pour cette raison on les appelle les muscles *appendeurs de la hanche*.

Par contre, les muscles à *direction longitudinale*, comme les muscles adducteurs **4**, ont tendance à luxer la tête fémorale au-dessus de l'acétabulum (côté droit de la figure 103) surtout si le toit de l'acétabulum est éversé ; cette malformation de l'acétabulum s'observe lors des luxations congénitales de la hanche et peut facilement être reconnue sur une radiographie de face du bassin **(Fig. 104)** : normalement l'*angle d'Hilgenriener*, compris entre la ligne horizontale passant par les cartilages en Y (appelée « ligne des y ») et la ligne tangente au toit de l'acétabulum, est de 25° chez le nouveau-né, et de 15° à la fin de la première année ; lorsque cet angle dépasse 30°, on peut dire qu'il existe une malformation congénitale de l'acétabulum. La luxation se reconnaît à l'*ascension du noyau céphalique au-dessus de la ligne des y* (repère de Putti) et à l'*inversion de l'angle de Wiberg* (voir Fig. 37 p. 19). Lorsqu'il existe une malformation de l'acétabulum, l'action luxante des muscles adducteurs **4'** est d'autant plus marquée que la cuisse se trouve *en adduction* **(Fig. 103)** ; par contre, la composante luxante des adducteurs *diminue avec l'abduction* **(Fig. 105)**, si bien qu'ils finissent par *devenir coapteurs en abduction complète*.

L'orientation du col fémoral intervient de manière considérable dans la stabilité de la hanche, que cette orientation soit considérée dans le plan frontal ou dans le plan horizontal. Nous avons vu (p. 18) que **dans le plan frontal** l'axe du col forme un *angle d'inclinaison* de **120-125°** avec l'axe diaphysaire **(a, Fig. 106 : diagramme de la hanche vue de face)**. Dans la luxation congénitale de la hanche, il existe une *ouverture de l'angle d'inclinaison* (coxa valga) qui peut atteindre 140° **b** ; lors de l'*adduction* **c**, l'axe du col aura donc une *avance* de 20° sur sa position normale : une adduction de 30° pour une hanche pathologique **P** correspondra donc à une adduction de 50° pou une hanche normale ; or une telle adduction *renforce la compo sante luxante des muscles adducteurs*. La coxa valga favoris la luxation pathologique. Inversement, cette hanche malformé sera *stabilisée par une position en abduction*, ce qui expliqu les positions employées pour le *traitement orthopédique de l luxation congénitale de la hanche*, la première étant une abduc tion à 90° **(Fig. 107 : schéma des positions de prévention d luxation de la hanche chez le nouveau-né)**.

Dans le plan horizontal (Fig. 108 diagramme de la hanche vue supérieure), la valeur moyenne de l'angle de déclinaison est de 20° **a**, du fait de l'orientation divergente du col et de l'acétabulum, due nous l'avons vu (p. 20) à la station bipède, et la partie antérieure de la tête fémorale est découverte par le cotyle. Si le col est encore plus orienté vers l'avant, du fait d'une *augmentation de l'angle de déclinaison* à 40° par exemple **b**, on dit qu'il y a *antéversion du col* et la tête est encore plus exposée à la luxation vers l'avant. En effet, pour une rotation externe de 25 **C**, l'axe d'un col normal *tombe* encore dans le cotyle N alors que l'axe du col antéversé **P** qui a 20° d'avance sur le col normal *tombe* sur le limbus acétabulaire : la hanche est *prête à se luxer en avant*. *L'antéversion du col favorise la luxation pathologique*. Inversement, la rétroversion du col fémoral est un facteur de stabilité, de même que la rotation interne **d** ; c'est pourquoi la position **3** de réduction orthopédique de la luxation congénitale **(Fig. 107)** est en rectitude et *rotation interne*.

Ces facteurs architecturaux et musculaires sont de la plus grande importance dans la **stabilité des prothèses**. L'opérateur lors d'une arthroplasie totale de la hanche doit veille particulièrement :

- à *orienter correctement le col* : pas trop d'antéversion, su tout s'il opère par voie antérieure, et vice versa ;
- à *orienter correctement le cotyle prothétique* qui, comm un cotyle naturel, doit *regarder* vers le bas (inclinaiso maximum sur l'horizontale : 45-50°) et légèrement ve l'avant (15°) ;
- à rétablir une « *longueur physiologique* » *du col fémor* c'est-à-dire un bras de levier normal des fessiers, qui joue un rôle essentiel dans la stabilité des prothèses.

C'est dire aussi l'importance du *choix de la voie d'abord*, qui d perturber au minimum l'équilibre musculaire.

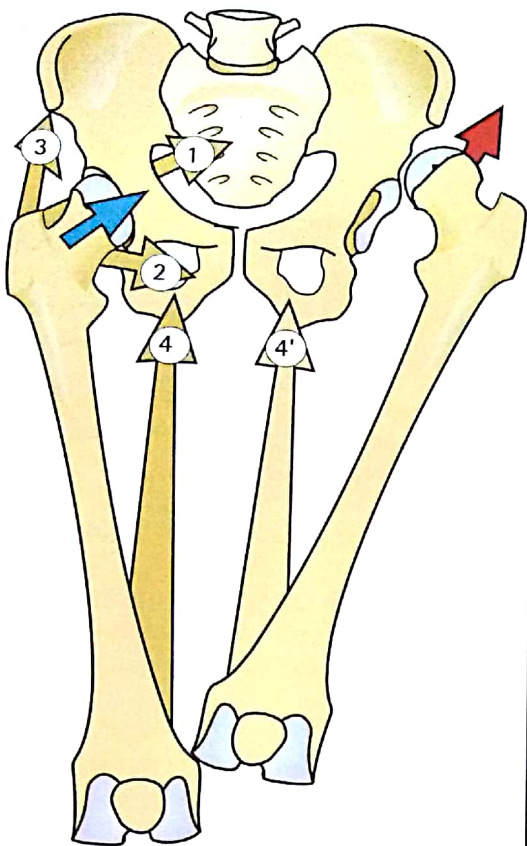


Fig. 103

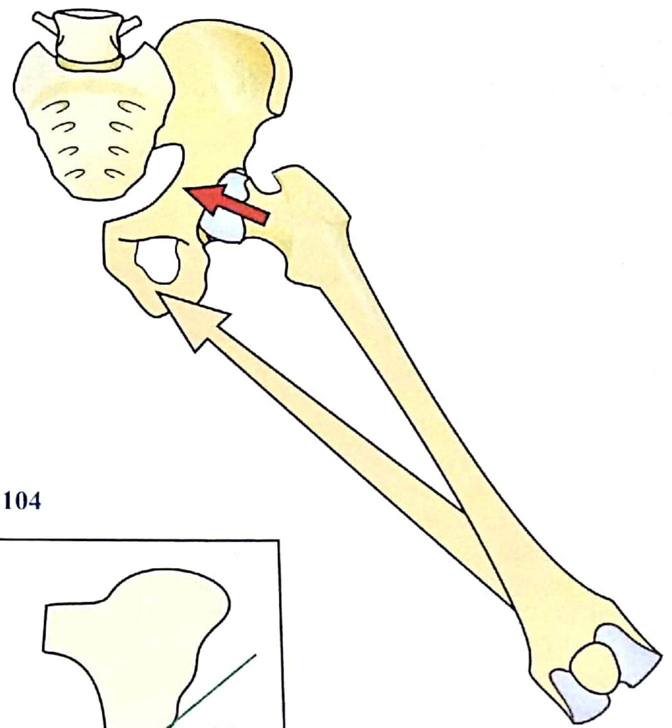


Fig. 104

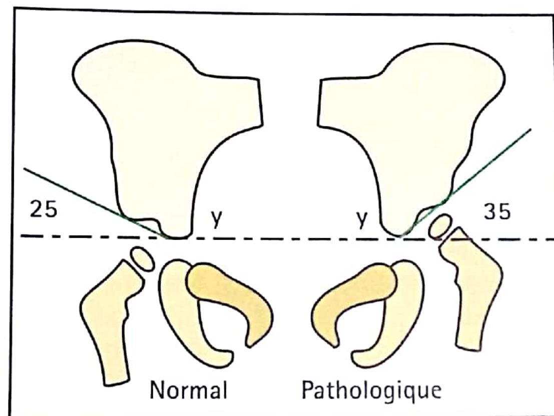


Fig. 105

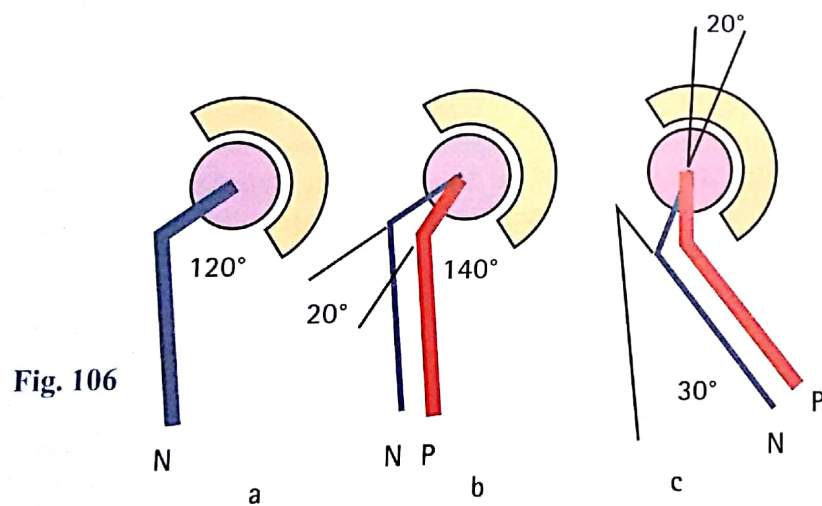


Fig. 106

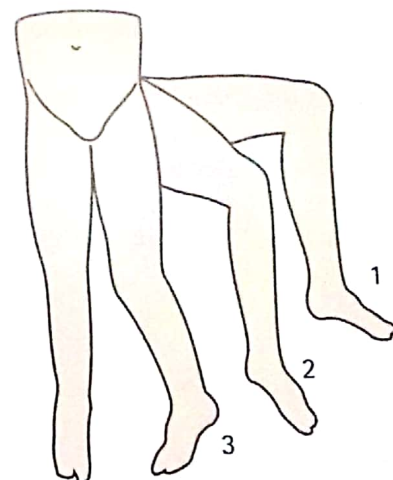


Fig. 107

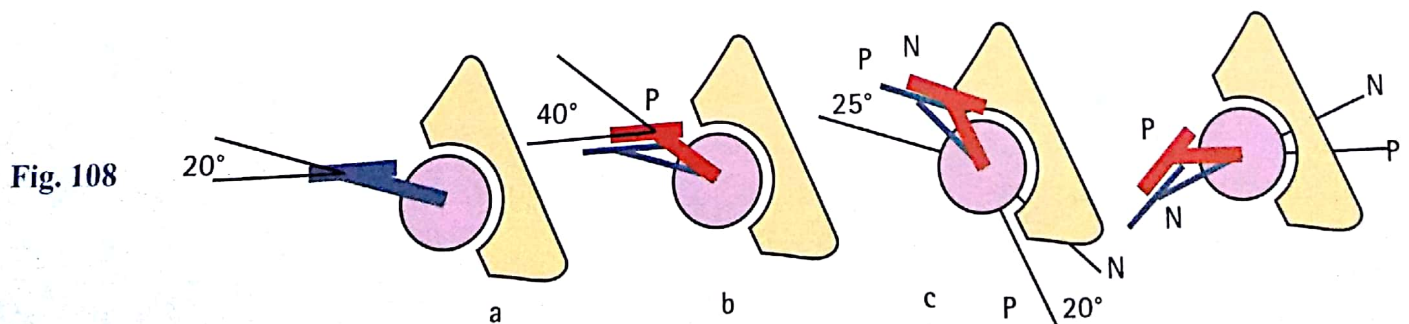


Fig. 108

Les muscles fléchisseurs de la hanche

Les muscles **fléchisseurs de la hanche** sont les muscles situés *en avant du plan frontal* passant par le centre de l'articulation **(Fig. 109)** ; ces muscles passent tous en avant de l'axe de flexion-extension **XX'** contenu dans ce plan frontal.

Les muscles fléchisseurs de la hanche sont nombreux ; ce sont **(Fig. 110 : vue du bassin en transparence)** :

- le muscle **psoas 1** et le muscle **iliaque 2** dont les tendons confondus se fixent sur le *petit trochanter* après s'être réfléchis sur l'éminence ilio-pectinée. C'est le plus puissant de tous les fléchisseurs et en tous cas, celui dont la course est la plus longue (les fibres les plus hautes du muscle psoas s'insèrent sur D12). Son action d'adduction est contestée par de nombreux auteurs bien que son tendon passe en dedans de l'axe antéro-postérieur ; cette absence d'adduction pourrait s'expliquer par le fait que le sommet du petit trochanter *se projette sur l'axe mécanique du membre inférieur* (voir Fig. 49, p. 23). Cependant, en faveur de son action d'*adduction*, on peut constater sur le squelette que c'est en flexion-adduction-rotation externe que la distance entre petit trochanter et éminence ilio-pectinée est la plus courte. Le muscle ilio-psoas est aussi *rotateur externe* ;
- le muscle **sartorius 3** est principalement *fléchisseur* de la hanche et accessoirement *abducteur-rotateur externe* **(Fig. 111 : c'est la jambe qui lance le ballon)** ; il a aussi une action *sur le genou* (flexion-rotation interne ; voir Fig. 253, p. 149). Sa puissance de 2 kgm n'est pas négligeable et 90 % sont absorbés dans la flexion ;
- le muscle **droit de la cuisse 4** est un fléchisseur puissant (5 kgm), mais son action sur la hanche *dépend du degré de flexion du genou* : il est d'autant plus efficace sur la hanche *que le genou est plus fléchi* (voir p. 145). Il intervient surtout dans les mouvements associant l'extension du genou et la flexion de la hanche, comme dans l'avancée du membre oscillant dans la marche **(Fig. 112)** ;
- le muscle **tenseur du fascia lata 5**, outre son action de stabilisation du pelvis (voir p. 50) et sa puissante action d'abduction, possède une *composante de flexion* considérable.

Certains muscles possèdent accessoirement une composante de *flexion* sur la hanche et leur action adjuvante n'est pas négligeable ; ce sont :

- le muscle **pectiné 6**, qui est *surtout adducteur* ;
- le muscle **long adducteur 7**, qui conduit la flexion jusqu'à un certain point (voir p. 54) ;
- le muscle **gracile 8** ;
- les faisceaux les plus antérieurs des muscles **petit** et **moyen fessiers 9**.

Tous ces fléchisseurs de la hanche ont, à titre d'actions secondaires, des *composantes d'adduction-abduction ou de rotation externe-interne*, si bien que, de ce point de vue, on peut les répartir en deux groupes.

Dans le **premier groupe** on range les **faisceaux antérieurs des muscles petit et moyen fessiers 9** et le muscle **tenseur du fascia lata 5**. Ce sont les *fléchisseurs-abducteurs-rotateurs internes* (cuisse droite de la figure 110), dont la contraction isolée ou prédominante détermine le mouvement de ce joueur de football **(Fig. 113)**.

Dans le **deuxième groupe** se retrouvent le muscle **ilio-psoas 1** et **2**, le muscle **pectiné 6** et le muscle **long adducteur 7**, qui réalisent le mouvement de *flexion adduction-rotation externe* (cuisse gauche de la figure 110) comme chez le footballeur de la figure 114.

Lors de la **flexion directe**, comme dans la *marche* **(Fig. 112)**, il est nécessaire que ces deux groupes entrent en *contraction antagoniste-synergique équilibrée*. La **flexion-adduction-rotation interne (Fig. 115)** nécessite la prédominance des adducteurs et du tenseur du fascia lata ainsi que des petit et moyen fessiers, en tant que rotateurs internes.

X

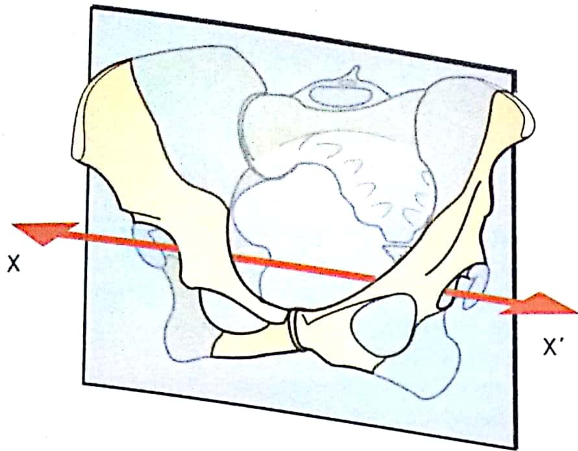


Fig. 109

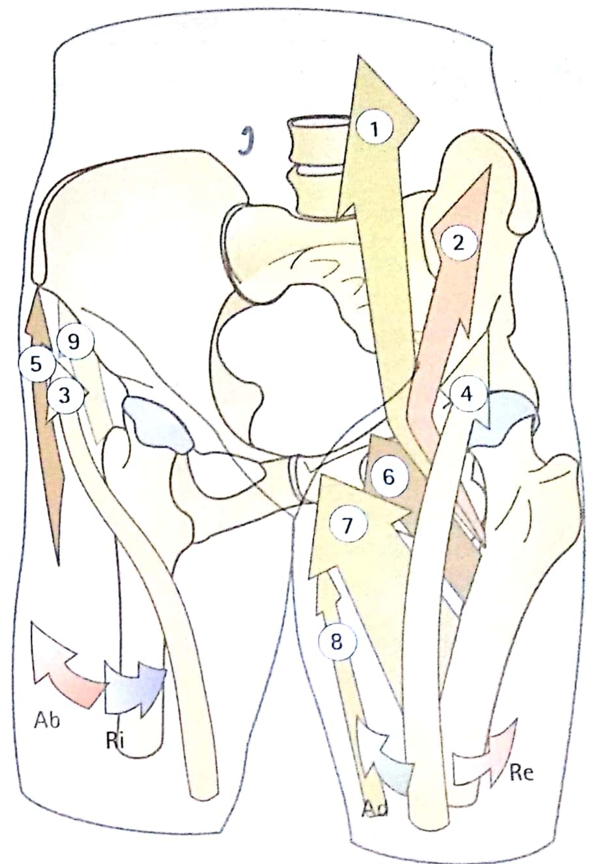


Fig. 110

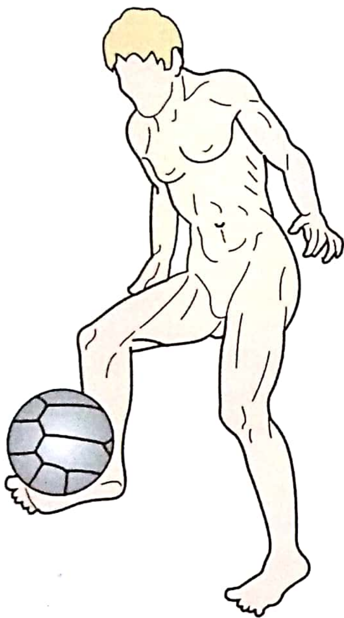


Fig. 111

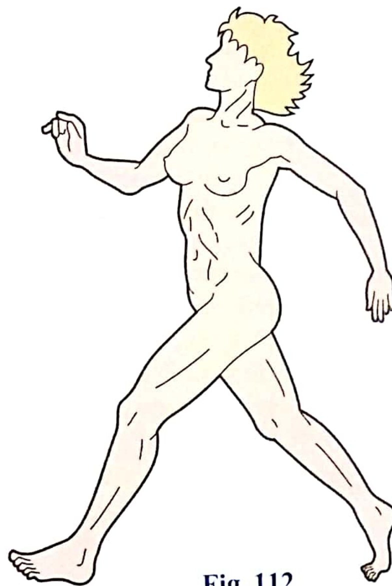


Fig. 112

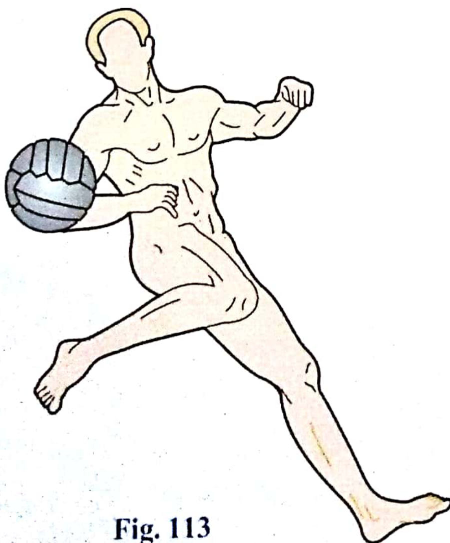


Fig. 113

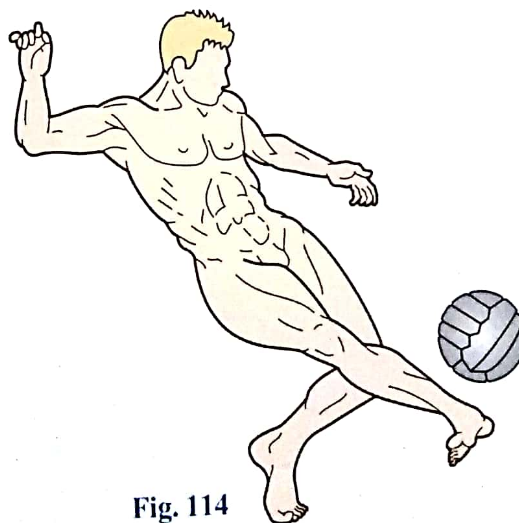


Fig. 114

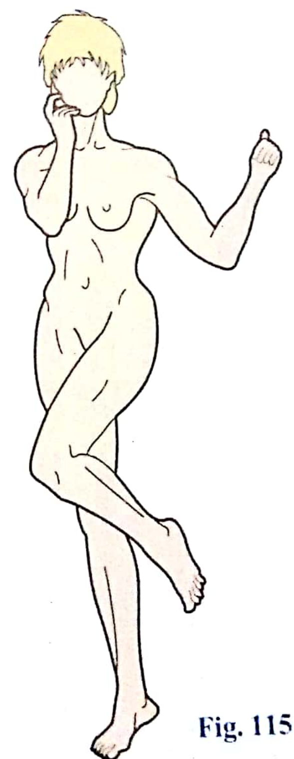


Fig. 115

Les muscles extenseurs de la hanche

Les **muscles extenseurs** de la hanche sont situés en arrière du plan frontal passant par le centre de l'articulation **(Fig. 116)**, plan qui contient l'*axe transversal* **XX'** de flexion-extension.
On distingue **deux groupes** de muscles extenseurs, suivant que leur insertion distale s'effectue sur l'extrémité supérieure du fémur ou au voisinage du genou **(Fig. 117)**.
Dans le **premier groupe**, situé à la racine du membre, le muscle le plus important est le muscle **grand fessier 1** et **1'**. C'est *le plus puissant muscle du corps* (34 kgm pour une course de 15 cm), mais aussi *le plus volumineux et le plus épais* (66 cm de section) et naturellement *le plus fort* (238 kg). Il est aidé par les faisceaux les plus postérieurs des muscles **moyen 2** et **petit fessiers 3**. Ces muscles sont en outre *rotateurs externes* (voir p. 64).
Dans le **deuxième groupe**, figurent essentiellement les **muscles ischio-jambiers** : **long biceps 4**, **semi-tendineux 5** et **semi-membraneux 6**, dont la puissance n'est que de 22 kgm (soit 66 % du muscle grand fessier). Ce sont des *muscles bi-articulaires* et leur efficacité sur la hanche *dépend de la position du genou* : le verrouillage du genou en extension favorise leur action d'extension sur la hanche. Il existe donc un *rapport d'antagonisme-synergie* entre les ischio-jambiers et le quadriceps fémoral, *surtout avec le muscle droit*. Parmi les muscles extenseurs du deuxième groupe, il faut aussi faire figurer une partie des *adducteurs* (voir p. 54) et en particulier le **grand adducteur 7**, qui est *accessoirement* extenseur de la hanche.
Les muscles extenseurs de la hanche possèdent des actions secondaires suivant leur position par rapport à l'axe antéro-postérieur **YY'** d'abduction-adduction :

- ceux dont le trajet passe **au-dessus de l'axe YY** déterminent une *abduction* en même temps que l'extension, comme dans le mouvement de danse de la figure 118 : ce sont les **faisceaux les plus postérieurs** du petit **3** et du moyen fessier **2** et les faisceaux les plus élevés du grand fessier **1'** ;
- ceux dont le trajet passe **au-dessous de l'axe YY'** sont à la fois *extenseurs et adducteurs*, comme dans le mouvement de la **figure 119** ce sont les **ischio-jambiers**, les **adducteurs** (ceux qui sont situés en arrière du plan frontal) et la plus grande partie du **grand fessier 1**.

Lorsqu'on veut obtenir un mouvement d'**extension directe** **(Fig. 120)**, c'est-à-dire sans composante d'abduction ni d'adduction, il faut faire intervenir ces deux groupes musculaires par *contraction antagoniste-synergique équilibrée*.
Les extenseurs de la hanche jouent un rôle essentiel dans la **stabilisation du bassin dans le sens antéro-postérieur** :

- lorsque le bassin est basculé vers l'arrière **(Fig. 121)**, c'est-à-dire dans le sens de l'extension, il est stabilisé uniquement par la *tension du ligament ilio-fémoral* **IF** – limitateur d'extension (voir Fig. 71 p. 31) ;
- il existe une position **(Fig. 122)** où le centre de gravité **C** se trouve exactement *au-dessus du centre de la hanche* : ni les fléchisseurs, ni les extenseurs n'interviennent, mais l'équilibre est *instable* ;
- lorsque le bassin bascule en avant **(Fig. 123)**, le centre de gravité **C** passe *en avant de la ligne des hanches* et les ischio-jambiers **IJ** entrent en action les premiers, pour le redresser ;
- dans les efforts de redressement sur bassin très basculé **(Fig. 124)** le *grand fessier* **F** se contracte à son tour énergiquement, de même que les *ischio-jambiers* qui sont d'autant plus efficaces que le genou est en extension dans la *position debout*, tronc penché en avant, les mains touchant les pieds.

Lors de la **marche normale,** l'extension est le fait des ischio-jambiers, *le grand fessier n'intervient pas*. Il n'est pas de même dans la course, le saut, la marche en terrain montant où le *fessier est indispensable* et joue un rôle de premier plan, ce qui explique son développement.

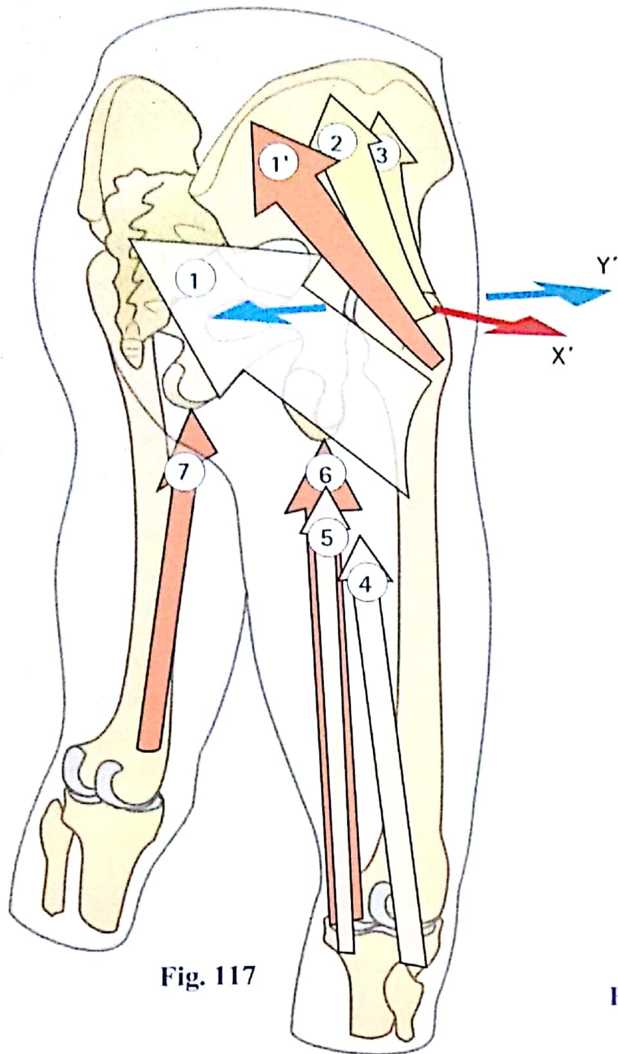


Fig. 117

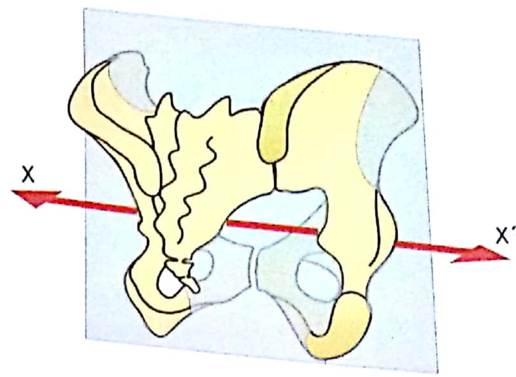


Fig. 116

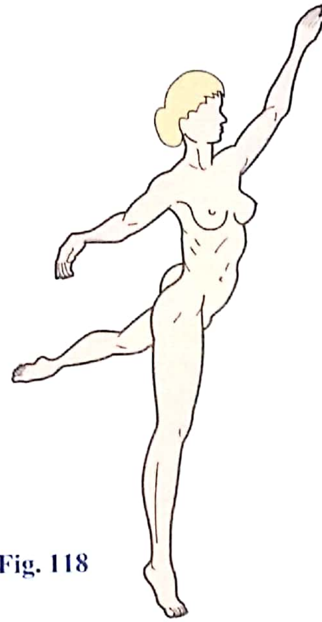


Fig. 118



Fig. 119

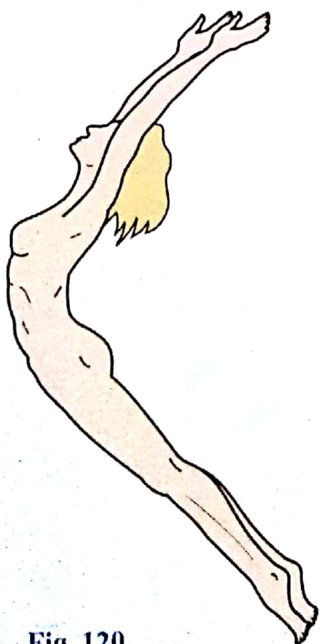


Fig. 120

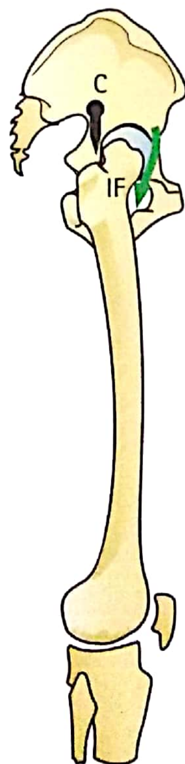


Fig. 121

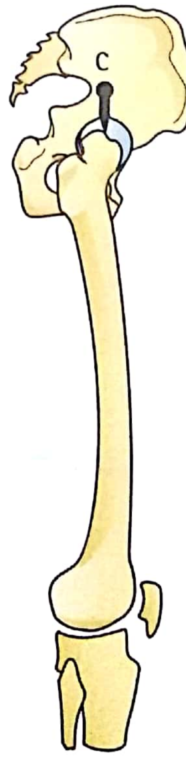


Fig. 122

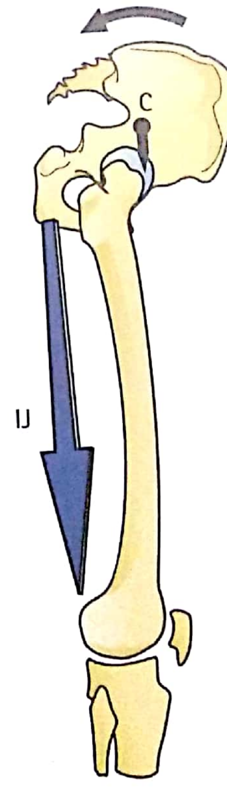


Fig. 123

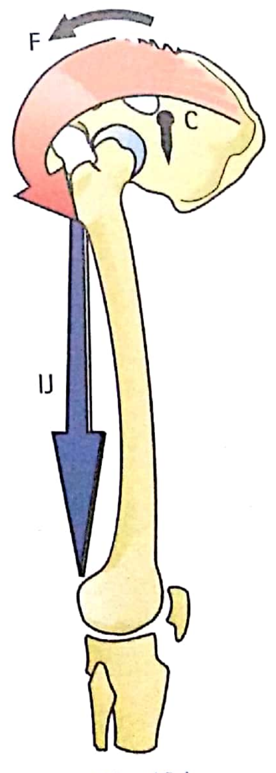


Fig. 124

Les muscles abducteurs de la hanche

Les **muscles abducteurs de la hanche** sont généralement situés *en dehors du plan sagittal* passant par le centre de l'articulation **(Fig. 125)** et dont le trajet passe en dehors et au-dessus de l'axe antéro-postérieur **YY'** d'abduction-adduction contenu dans ce plan.

Le *principal muscle abducteur* de la hanche est le muscle **moyen fessier 1** : avec ses 40 cm de surface de section et sa course de 11 cm, il déploie une puissance de 16 kgm. Il possède une grande efficacité, car sa direction est presque perpendiculaire à son bras de levier **OT (Fig. 126)**. Nous verrons aussi qu'il joue un rôle essentiel, avec le muscle petit fessier, dans la stabilisation transversale du bassin (voir p. 50).

Le muscle **petit fessier 2** est essentiellement abducteur **(Fig. 123)** ; sa section de 15 cm et sa course de 9 cm lui donnent une puissance trois fois moindre que celle du moyen fessier (4,9 kgm).

Le muscle **tenseur du fascia lata 3** est très fortement abducteur sur la hanche en rectitude ; sa puissance vaut à peu près la moitié de celle du moyen fessier (7,6 kgm) mais son bras de levier est beaucoup plus long que celui du moyen fessier. Il est aussi *stabilisateur du bassin*.

Le muscle **grand fessier 4** n'est abducteur que pour ses *faisceaux les plus élevés*. Il s'ensuit que la plus grande partie de ce muscle est adductrice. Par sa partie superficielle, qui prend part à la constitution du deltoïde fessier **(Fig. 131)**, il est abducteur.

Le muscle **piriforme 5** a une action abductrice indéniable, dont il est difficile cependant d'apprécier expérimentalement l'importance, en raison de sa situation profonde.

Suivant leurs *actions secondaires dans la flexion-extension* et *l'abduction-adduction*, on peut classer les muscles abducteurs en **deux groupes**.

Dans le **premier groupe**, on range tous les muscles abducteurs situés *en avant du plan frontal* passant par le centre de l'articulation : le muscle tenseur du fascia lata, les faisceaux antérieurs du moyen et du petit fessier en presque totalité. Ces muscles déterminent, par leur contraction isolée ou prédominante, un mouvement d'*abduction-flexion-rotation interne* **(Fig. 128)**.

Dans le **deuxième groupe**, on trouve les faisceaux postérieurs du petit et du moyen fessier (ceux qui sont situés en arrière du plan frontal), ainsi que les faisceaux abducteurs du grand fessier. Ces muscles déterminent par leur contraction isolée ou prédominante un mouvement d'*abduction-extension-rotation externe* **(Fig. 129)**.

Pour obtenir une **abduction directe (Fig. 130)**, c'est-à-dire sans aucune composante parasite, il faut que ces deux groupes entrent en *contraction antagoniste-synergique équilibrée*.

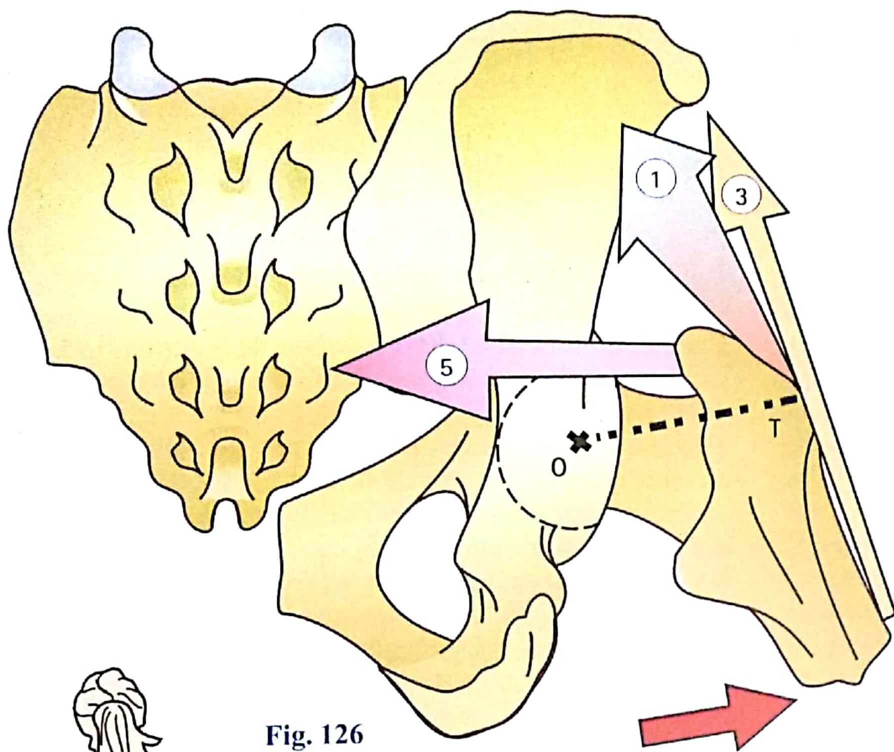


Fig. 126

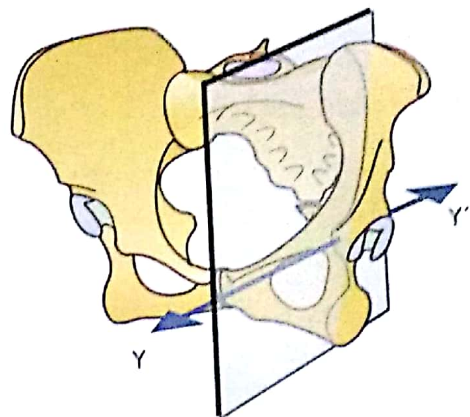
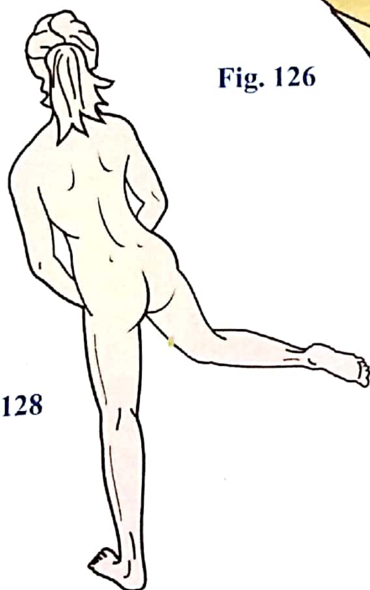
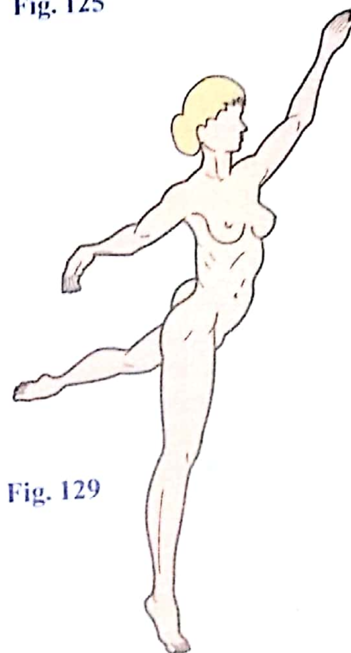
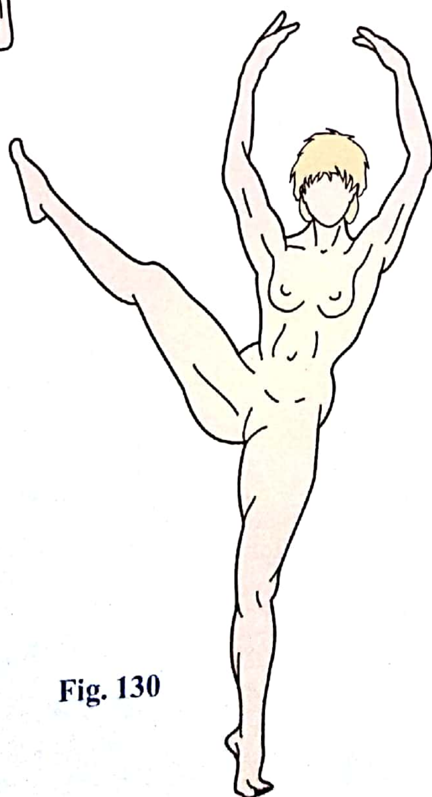


Fig. 125


Fig. 128


Fig. 129


Fig. 130

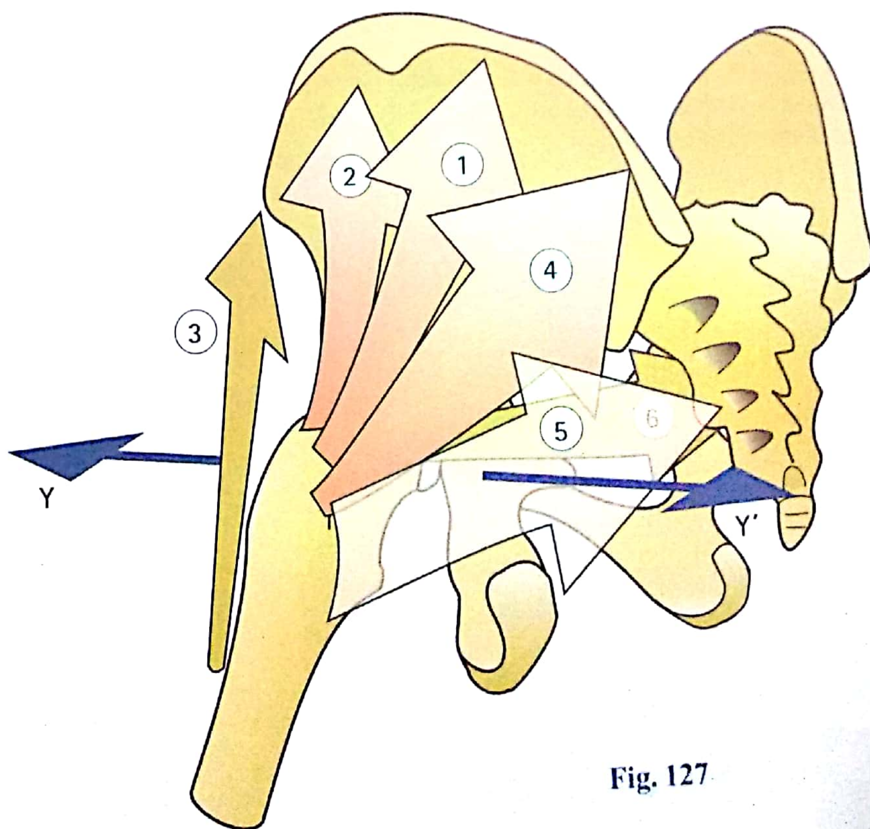


Fig. 127

L'abduction

Le muscle **deltoïde fessier**, comme le nomme Farabeuf, forme un large éventail musculaire **(Fig. 131)** à la face externe de la hanche. Il doit son nom à sa *forme triangulaire* à pointe inférieure et à son analogie tant anatomique que fonctionnelle avec le deltoïde brachial. Cependant, il n'est pas formé d'une nappe musculaire continue mais de *deux corps musculaires* occupant les bords antérieur et postérieur du triangle ; *en avant*, le muscle **tenseur du fascia lata 1**, inséré sur l'épine iliaque antérieure et supérieure **2**, se dirige obliquement en bas et en arrière ; et *en arrière* la **partie superficielle du muscle grand fessier 3**, fixée sur le tiers postérieur de la crête iliaque et la crête sacrée, se dirige en bas et en avant. Ces deux muscles se terminent dans un **dédoublement du bord antérieur et du bord postérieur de la bandelette ilio-fémorale 4**, épaississement longitudinal du fascia lata, formé par la partie externe de l'aponévrose crurale. Ainsi, à partir de l'insertion du tenseur et du fessier superficiel, cette bandelette devient le tendon terminal du deltoïde fessier **5** qui va se fixer à la face externe de la tubérosité tibiale externe sur le tubercule infracondylaire **6**. Entre tenseur et grand fessier, le fascia glutéal **7** recouvre le moyen fessier. Naturellement, les deux parties musculaires du deltoïde fessier peuvent se contracter isolément, mais lorsqu'elles entrent en *action de manière équilibrée*, la traction sur le tendon s'effectue dans l'axe longitudinal et le deltoïde fessier réalise une *abduction pure*.

L'efficacité du moyen et du petit fessier est conditionnée par la **longueur du col fémoral (Fig. 132)**. Supposons, en effet, que la tête fémorale soit « *posée* » *directement sur la diaphyse*, l'amplitude totale de l'abduction en serait considérablement augmentée, mais le *bras de levier* **OT'** du moyen fessier serait presque *trois fois plus court*, ce qui diviserait par trois l'efficacité de ce muscle. Ainsi se trouve rationnellement expliqué le montage de la tête fémorale en porte-à-faux à l'extrémité du col (voir p. 19, 21 et 23), solution mécanique plus fragile, limitant plus rapidement l'abduction, mais *renforçant l'action du moyen fessier*, indispensable pour la stabilisation transversale du bassin.

L'**action du moyen fessier** sur le bras de levier du col fémoral est variable suivant le degré d'abduction en position de rectitude de la hanche **(Fig. 133)**. La force du muscle **F** n'est pas perpendiculaire au bras de levier **OT** ; elle peut ainsi être décomposée en un vecteur **f''** dirigé vers le centre de l'articulation, donc *centripète*, **composante coaptrice** du moyen fessier **(Fig. 133)**, et un *vecteur perpendiculaire* **f'**, donc *tangentiel*, qui représente la *force efficace* du muscle lors du départ de l'abduction. Par la suite, à mesure que l'abduction augmente **(Fig. 134)**, le vecteur **f''** a tendance à diminuer tandis que le vecteur **f'** augmente. Le moyen fessier est donc *de moins en moins coapteur et de plus en plus abducteur*. Son maximum d'efficacité se situe pour une abduction de 35° environ : à ce moment la direction de sa force est *perpendiculaire au bras de levier* **0T2** et **f'** se confond avec F – *toute la force du muscle est utilisée pour l'abduction*. Le muscle s'est raccourci de la longueur **T1T2**, soit à peu près un tiers de sa longueur : il lui reste encore un sixième de sa course.

L'**action du muscle tenseur du fascia lata (Fig. 135)** peut être étudiée de même. Sa force **F** appliquée sur l'épine iliaque **C1** se décompose en deux vecteurs : **f1''** centripète et **f1'** tangentiel, qui fait basculer le bassin. À mesure que l'abduction s'affirme **(Fig. 136)**, la composante **f2'** augmente, mais jamais elle ne peut être égale à la force globale **F** du muscle. D'autre part, il est facile de voir sur ce schéma que le raccourcissement **C1'C2** du muscle représente une fraction minime de sa longueur totale de l'épine au tubercule : cela explique que le corps musculaire soit court par rapport à la longueur du tendon, puisqu'on sait que la course maximum d'un muscle ne dépasse pas la moitié de la longueur de ses fibres contractiles.

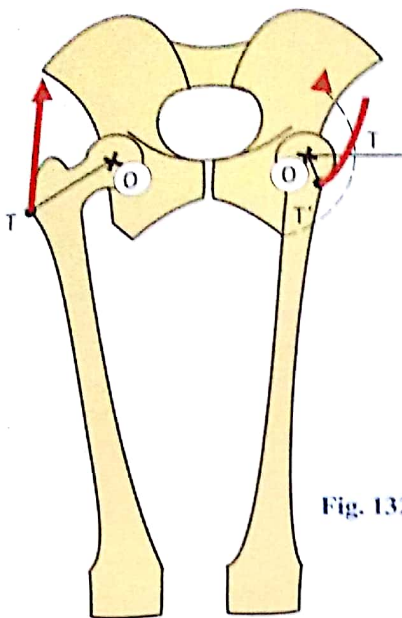


Fig. 132

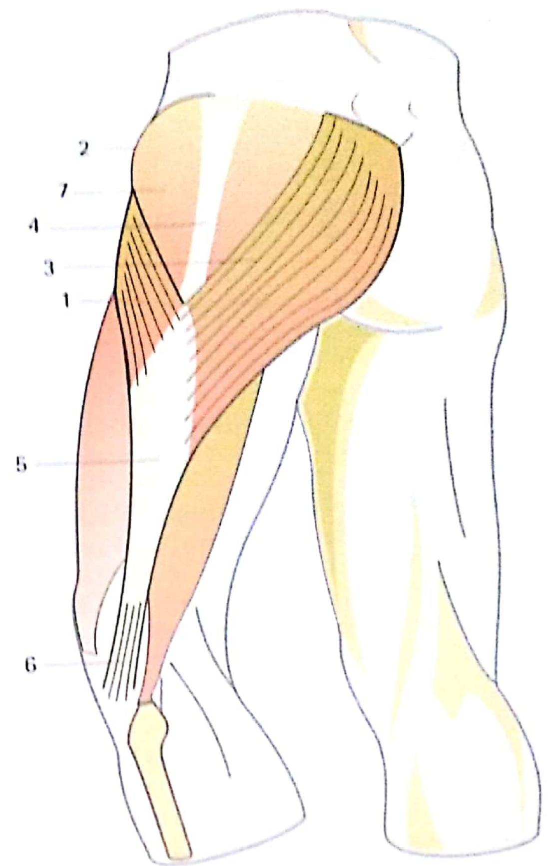


Fig. 131

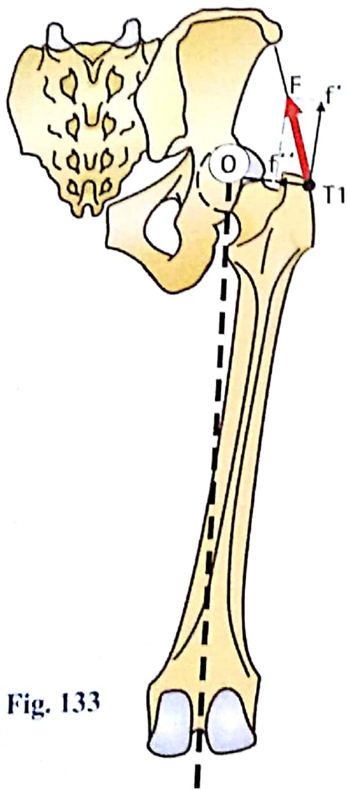


Fig. 133

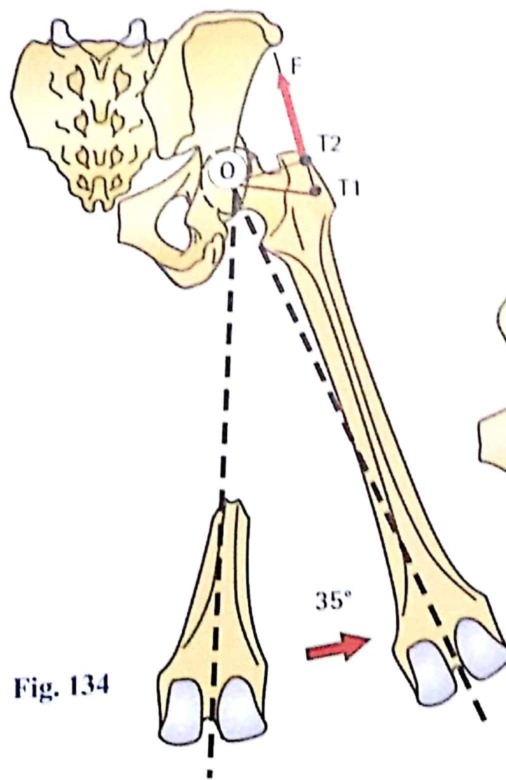


Fig. 134

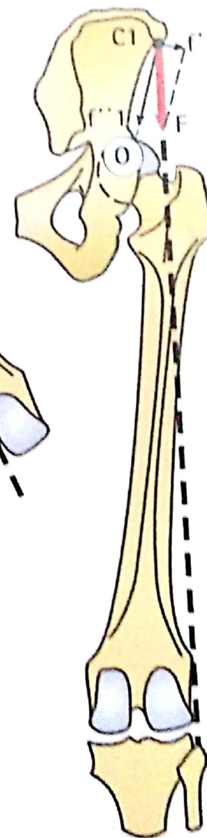


Fig. 135

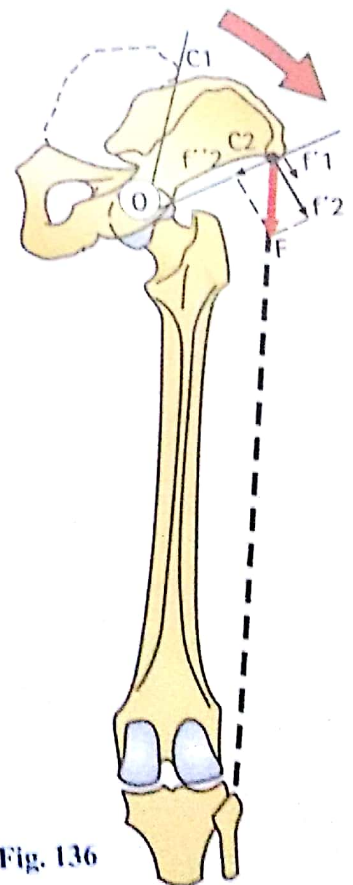


Fig. 136

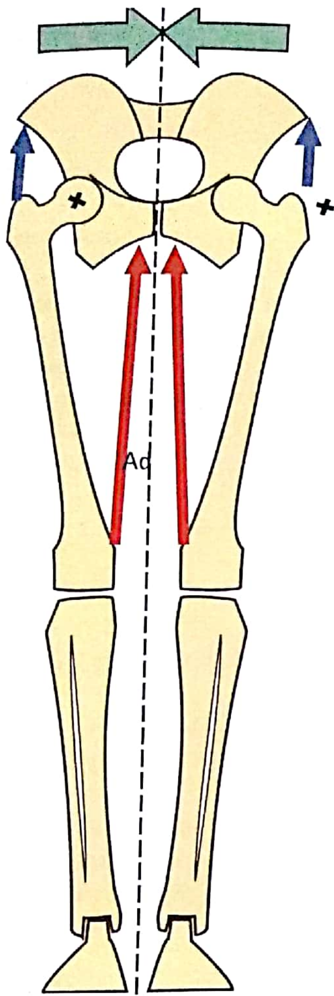
L'équilibre transversal du bassin

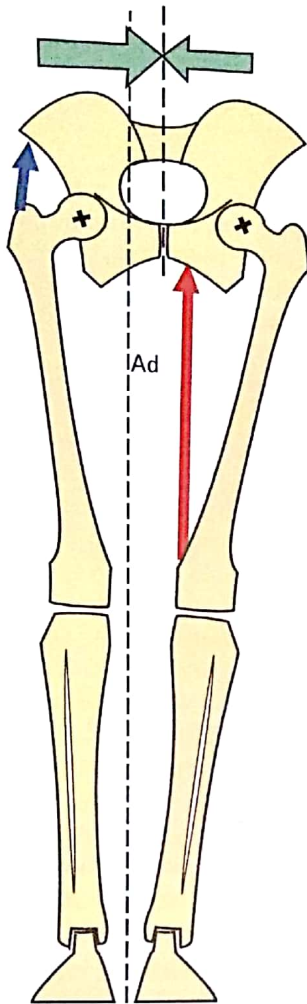
Lorsque le **bassin est en appui bilatéral**, son équilibre transversal est assuré par l'action simultanée et bilatérale des adducteurs **(flèches rouge)** et des abducteurs **(flèches bleues)**. Quand ces actions antagonistes sont équilibrées **(Fig. 137)**, le bassin est *stable en position symétrique*, comme dans le « garde-à-vous » par exemple. Si d'un côté les abducteurs l'emportent, alors que de l'autre côté les adducteurs sont prédominants **(Fig. 138)**, le bassin va se *déplacer latéralement* vers le côté où les adducteurs l'emportent ; faute d'un nouvel équilibre musculaire, c'est la chute latérale.

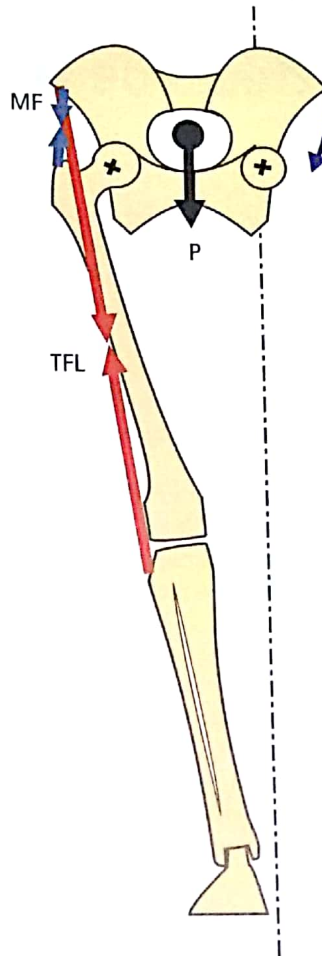
Lorsque le **bassin est en appui unilatéral (Fig. 139)**, l'équilibre transversal est assuré uniquement par l'action des abducteurs du côté de l'appui : sollicité par le poids du corps **P** appliqué au centre de gravité, le bassin a tendance à basculer autour de la hanche porteuse. On peut alors assimiler la ceinture pelvienne à un *levier du premier genre* **(Fig. 141)**, où le point d'appui est constitué par la hanche porteuse **O**, la résistance par le poids du corps **P** appliqué au niveau du *centre de gravité* **G** et la puissance par la *force du moyen fessier* **MF** appliquée sur la fosse iliaque externe **E**, vers le grand trochanter **T**. Pour que la ligne des hanches reste horizontale en appui unilatéral, il faut que la force du moyen fessier soit suffisante pour équilibrer le poids du corps, en tenant compte de l'inégalité des bras de levier **OE** et **OG**. Dans cette mise en équilibre du bassin, le moyen et le petit fessier **MF** ne sont pas seuls, ils sont puissamment aidés par le tenseur du fascia lata **TFL**. **(Fig. 139)**

Si l'un de ces muscles devient insuffisant **(Fig. 140)**, l'action de la pesanteur n'est plus contre-balancée et l'on voit le bassin s'incliner du côté opposé d'un **angle a** d'autant plus important que la paralysie est plus marquée. Le tenseur du fascia lata stabilise non seulement le bassin *mais encore le genou* : comme nous le verrons plus loin (voir Fig. 154, p. 113) c'est un véritable *ligament latéral externe actif*, son insuffisance peut donc, à la longue, favoriser un *bâillement externe* de l'interligne du genou **(angle b)**.

La stabilisation du bassin par le moyen, le petit fessier et le tenseur est indispensable à la **marche normale (Fig. 142)**. En effet, lors du temps d'appui unilatéral, la ligne du bassin, matérialisée par la *ligne bi-iliaque*, reste horizontale et sensiblement parallèle à la ligne des épaules. Si ces muscles sont paralysés du côté de l'appui unilatéral **(Fig. 143)**, le bassin bascule du côté opposé, ce qui entraînerait la chute si le tronc ne se déportait pas en bloc vers le côté de l'appui avec bascule inverse de la ligne des épaules. Cette attitude caractéristique en appui unilatéral associant la bascule du bassin du côté opposé et le *déport de la partie supérieure du tronc* constitue le **signe de Duchenne-Trendelembourg**, témoin de la *paralysie ou de l'insuffisance des petit-moyen fessiers*.







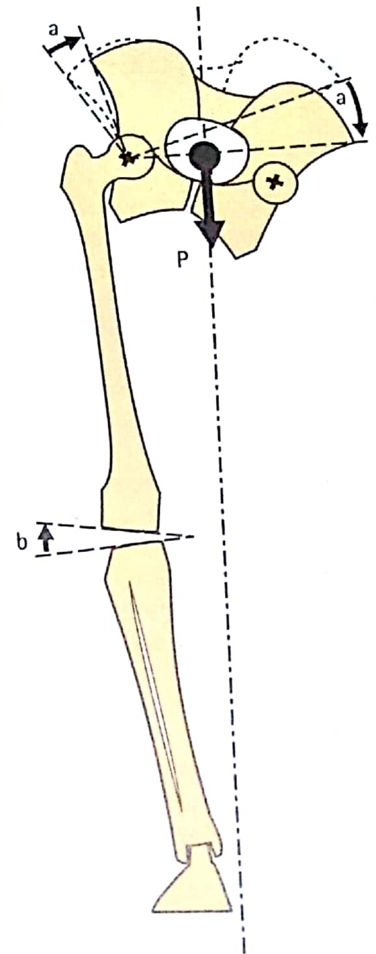


Fig. 137

Fig. 138

Fig. 139

Fig. 140

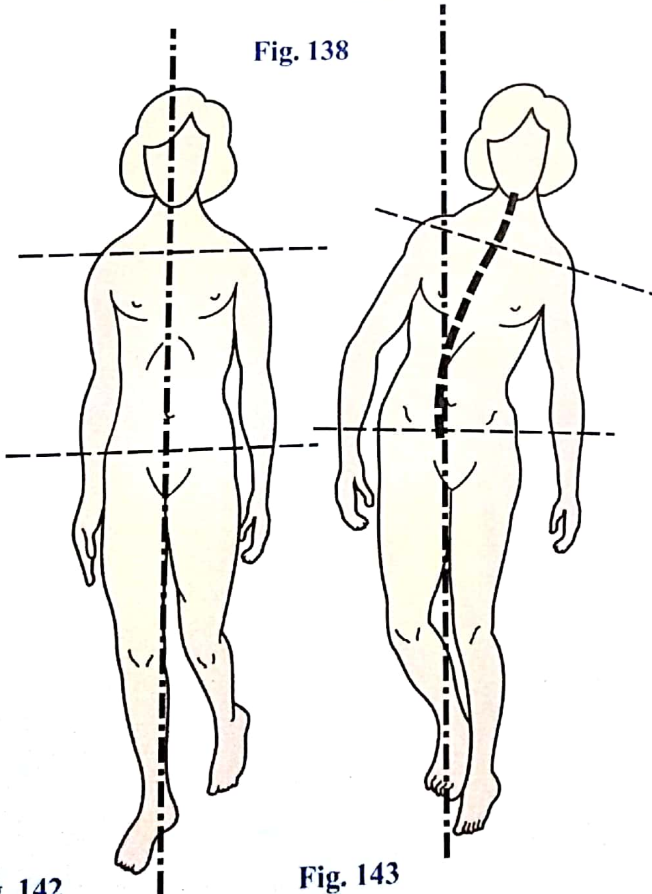


Fig. 142

Fig. 143

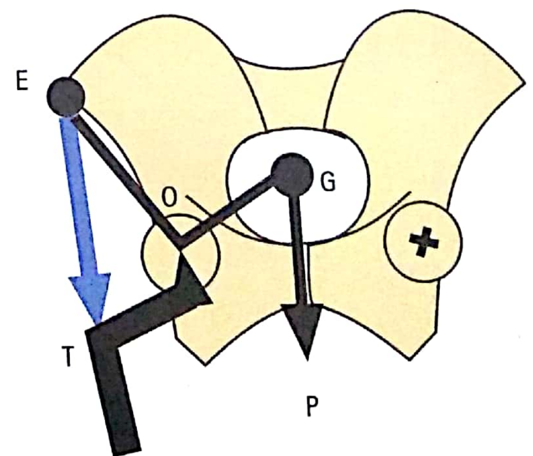


Fig. 141

Les muscles adducteurs de la hanche

Les muscles adducteurs de la hanche sont généralement situés en dedans du plan sagittal passant par le centre de l'articulation **(Fig. 142)**. En tout cas, la direction de ces muscles passe *en dessous et en dedans* de l'axe antéro-postérieur **yy'** d'abduction-adduction, situé dans ce plan sagittal.

Les muscles adducteurs sont particulièrement *nombreux et puissants*. Sur une vue postérieure **(Fig. 143)**, ces muscles abducteurs forment un large éventail tendu sur toute la longueur du fémur.

Le muscle **grand adducteur 1** est *le plus puissant* (13 kgm) ; sa conformation bien particulière **(Fig. 144)** est due à ce que ses fibres les plus internes sur la branche ischio-pubienne s'insèrent le plus haut sur le fémur et que les plus externes sur l'os iliaque se terminent le plus bas sur la ligne âpre. Il en résulte *une forme en gouttière de ses faisceaux supérieur* **2** et *moyen* **1**, gouttière à *concavité postéro-externe* rendue visible ici grâce à la transparence du faisceau supérieur et à la désarticulation de la hanche avec rotation externe du fémur. Dans la concavité de ces deux faisceaux **(cartouche représentant la coupe suivant la flèche)** se trouve tendu le troisième faisceau, l'*inférieur*, encore appelé **troisième adducteur 3** qui forme un corps musculaire fusiforme distinct.

Cette disposition des fibres musculaires a pour résultat de *réduire l'allongement relatif* lors de l'abduction, donc de *permettre une plus grande amplitude d'abduction* en conservant l'efficacité du muscle. Cette proposition est illustrée par la figure 145 qui montre du côté A la direction réelle des fibres ; du côté B la direction réelle des fibres et la direction « simpliste », sans torsion en abduction **(tirets)** : les fibres les internes et les plus basses, les fibres les plus externes et les plus hautes (disposition inverse de la disposition réelle). Ces deux dispositions sont figurées en adduction **Ad** et en abduction **Ab**. L'allongement des fibres entre l'abduction et l'adduction apparaît nettement et se lit par l'écart entre les cercles balayés. Il se lit en **u** pour les fibres à point d'insertion pubienne, et en **v** pour les fibres d'insertion ischiatique. L'allongement est visible en **z** pour les fibres à destinée trochantérienne.

Revenant à la figure 143, on reconnaît les autres muscles ayant une composante d'adduction :

- le muscle **gracile 4** forme le bord interne de l'éventail musculaire ;
- les muscles **semi-membraneux 5**, **semi-tendineux 6** et long **biceps fémoral 7**, bien qu'étant des muscles ischio-jambiers essentiellement extenseurs de la hanche et fléchisseurs du genou, ont une *composante adductrice importante* ;
- le muscle **grand fessier 8** dans sa presque totalité (tous les faisceaux passant au-dessous de l'axe **yy'**) est adducteur ;
- le muscle **carré fémoral 9** est adducteur rotateur externe ;
- de même que le muscle **pectiné 10** ;
- le muscle **obturateur interne 11**, aidé des jumeaux pelviens (non figurés), et le muscle **obturateur externe 12** possèdent une composante d'adduction.

Fig. 144

Fig. 142

Fig. 143

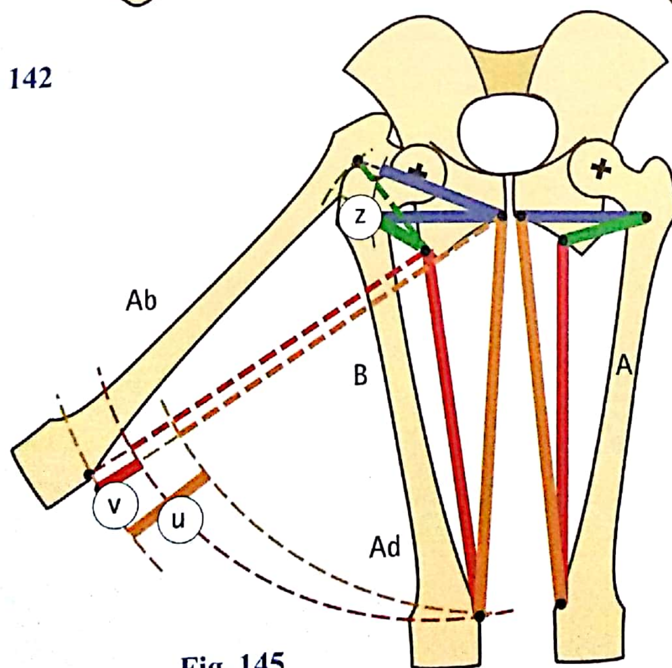


Fig. 145

Les muscles adducteurs de la hanche

Le **schéma de face des adducteurs (Fig. 146)** fait apparaître :

- le muscle **long adducteur 13**, dont la puissance (5 kgm) atteint à peine la moitié de celle du grand adducteur ;
- le muscle **court adducteur 14**, dont les deux faisceaux sont recouverts par le muscle long adducteur en bas et le muscle pectiné **10** en haut ;
- le muscle **gracile 4**, qui limite en dedans la loge des adducteurs.

À côté de leur action principale, les adducteurs possèdent des *composantes de flexion-extension et de rotation axiale*.

Leur **rôle dans la flexion-extention (Fig. 147, vue interne)** dépend du siège de leur insertion supérieure. Lorsque cette insertion se fait sur la branche ischio-pubienne en arrière du plan frontal passant par le centre de l'articulation **(ligne en points-tirets)**, ces muscles sont extenseurs ; c'est le cas en particulier pour les faisceaux inférieurs du muscle grand adducteur, le troisième adducteur et naturellement les ischio-jambiers. Lorsque l'insertion supérieure s'effectue en avant du plan frontal, les adducteurs sont en même temps fléchisseurs ; c'est le cas pour le muscle pectiné, les muscles court et long adducteurs, le faisceau supérieur du muscle grand adducteur, le muscle gracile. Cependant cette composante de flexion-extension dépend aussi de la position de départ de la hanche.

Les adducteurs, nous l'avons vu, sont indispensables pour l'équilibre du bassin en appui bilatéral ; ils jouent donc un rôle essentiel dans **certaines attitudes** ou certains mouvements sportifs tels le ski **(Fig. 148)** ou l'équitation **(Fig. 149)**.

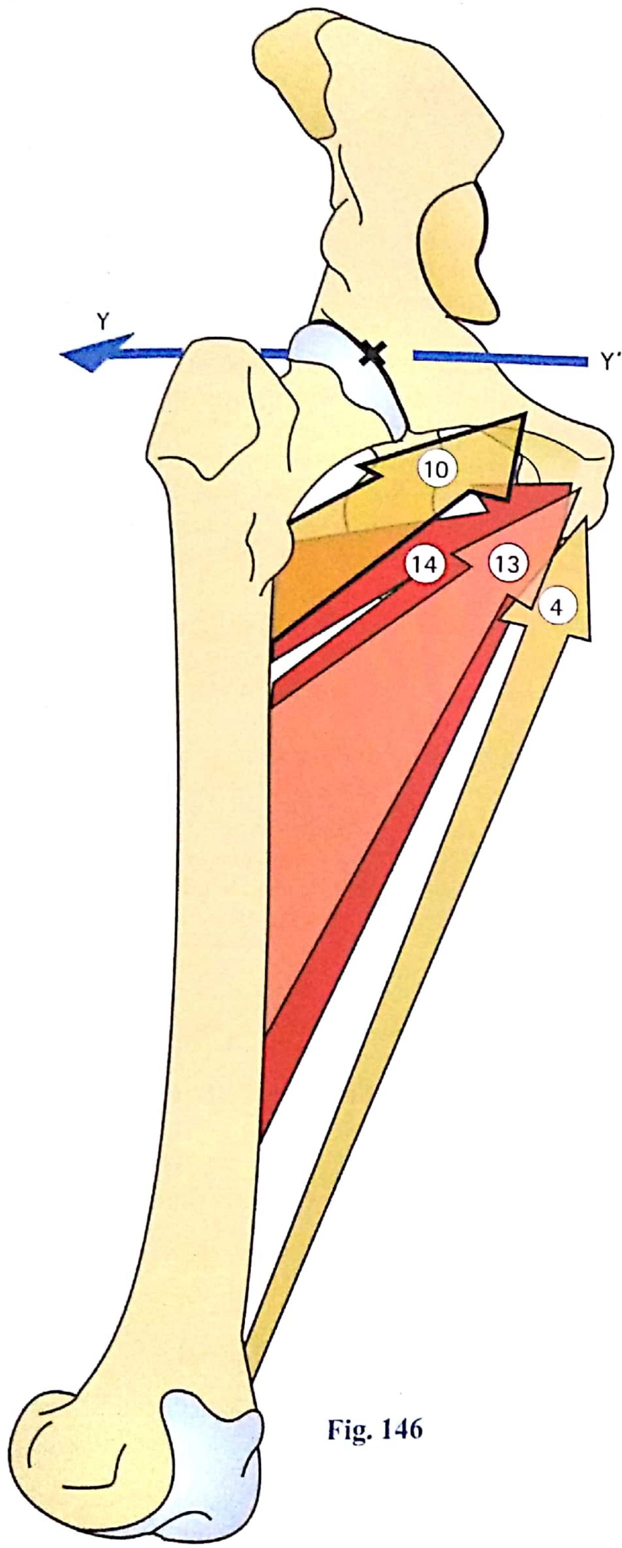


Fig. 146

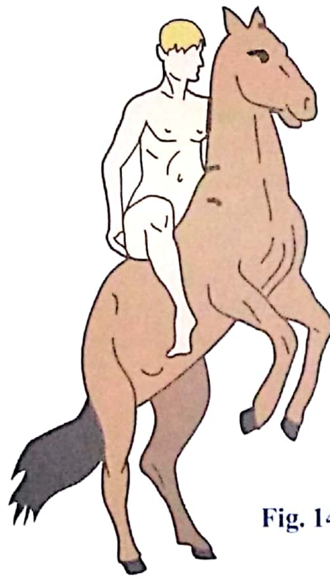


Fig. 149

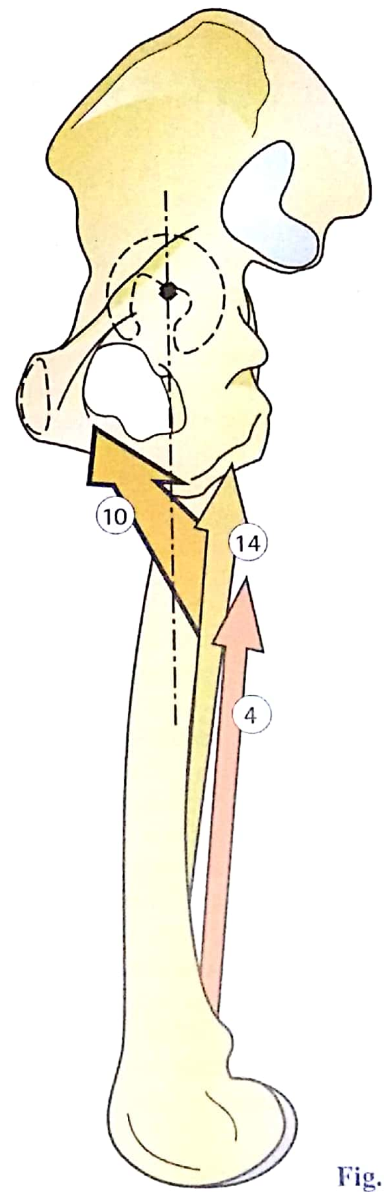


Fig. 147

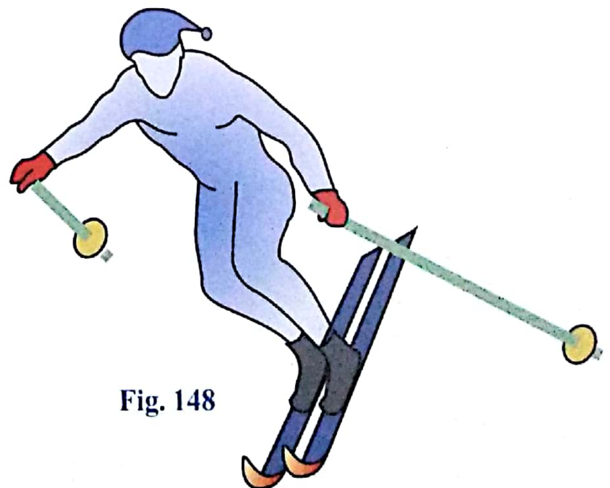


Fig. 148

Les muscles rotateurs externes de la hanche

Les muscles rotateurs externes de la hanche sont nombreux et puissants. Leur trajet croise *par en arrière l'axe vertical de la hanche*. Cette caractéristique apparaît nettement sur une **coupe horizontale du bassin (Fig. 150, vue supérieure)** passant légèrement au-dessus du centre de l'articulation et qui montre l'ensemble des rotateurs externes. Ce sont :

- les muscles **pelvi-trochantériens** dont c'est la fonction essentielle ;
- le muscle **piriforme** 1, fixé sur le bord supérieur du grand trochanter et qui se dirige en dedans et en arrière et pénètre dans la grande incisure ischiatique **(Fig. 151 : vue postéro-supérieure)** pour s'insérer sur la face antérieure du sacrum ;
- le muscle **obturateur interne**, qui suit d'abord un trajet sensiblement parallèle **2** au muscle piriforme, mais qui se réfléchit bientôt à angle droit sur le bord postérieur de l'os iliaque au-dessous de l'épine ischiatique **(Fig. 151)**. La deuxième partie de son trajet **2'** est *endo-pelvienne* et le conduit à ses insertions sur le pourtour interne du *foramen obturé*. Dans la première partie de son trajet, il est accompagné par les deux jumeaux pelviens, petits muscles qui longent ses bords supérieur et inférieur et s'insèrent **(Fig. 151 : voir les deux points rouges)** au voisinage respectivement de l'*épine ischiatique* et de la *tubérosité ischiatique*. Ils se terminent sur la face interne du grand trochanter par un tendon commun avec l'obturateur interne. Leur action est identique ;

le muscle **obturateur externe 3**, qui s'insère dans le fond de la fossette digitale, à la *face interne du grand trochanter* ; son tendon contourne ensuite la face postérieure du col fémoral puis la face inférieure de l'articulation ; ses fibres charnues se fixent sur la face externe du pourtour du *foramen obturé*. Dans l'ensemble, il s'enroule autour du col et pour le voir dans sa totalité, il faut fléchir fortement le bassin sur le fémur **(Fig. 152 : vue postéro-inféro-externe du bassin, sur hanche fléchie)**. On comprend ainsi deux caractéristiques de son action : il est *surtout rotateur externe* sur la hanche fléchie (voir aussi page suivante) et il est légèrement fléchisseur de la hanche du fait de son enroulement autour du col ;

- certains **muscles adducteurs**, qui sont aussi rotateurs externes ;
- le muscle **carré fémoral 4**, étendu de la ligne intertrochanténenne postérieure **(Fig. 151)** à la tubérosité ischiatique. Il est en outre extenseur ou fléchisseur suivant la position de la hanche **(Fig. 159)** ;
- le muscle **pectiné 6**, étendu de la ligne moyenne de trifurcation de la ligne âpre **(Fig. 152)** à la branche horizontale du pubis ; il est adducteur, fléchisseur, rotateur externe ;
- les faisceaux les plus postérieurs du muscle **grand adducteur**, qui possèdent une composante de rotation externe, de même que les muscles ischio-jambiers **(voir Fig. 153, p. 59)** ;
- les muscles **fessiers** ;
- le muscle **grand fessier** en totalité tant par sa partie superficielle **7** que profonde **7'** ;
- les *faisceaux postérieurs* du muscle **petit** et surtout du muscle **moyen fessier 8 (Fig. 150 et 151)**.

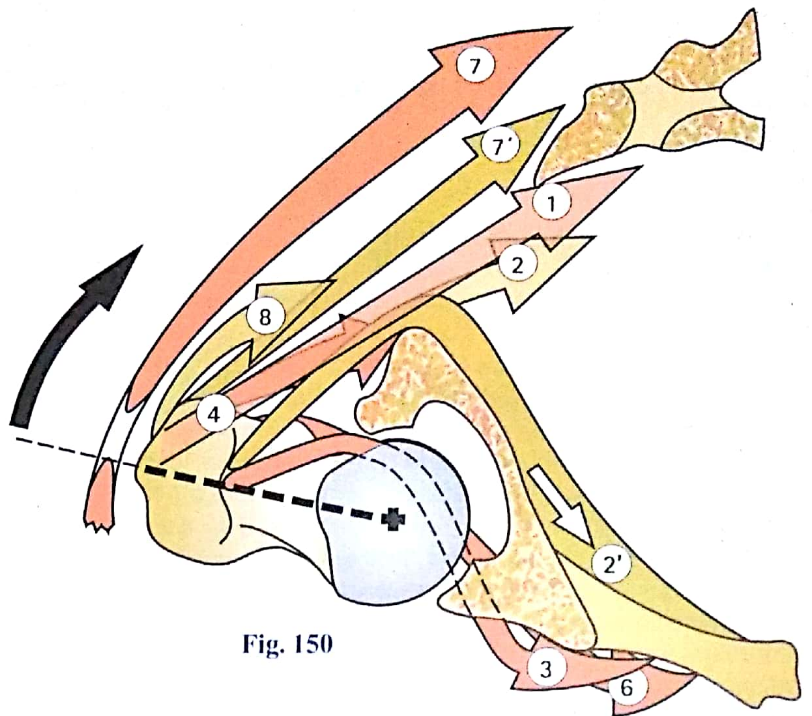


Fig. 150

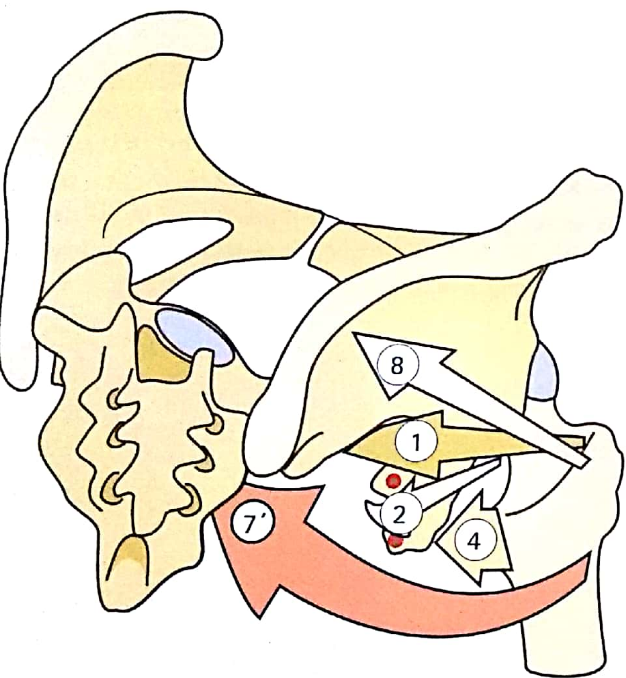


Fig. 151

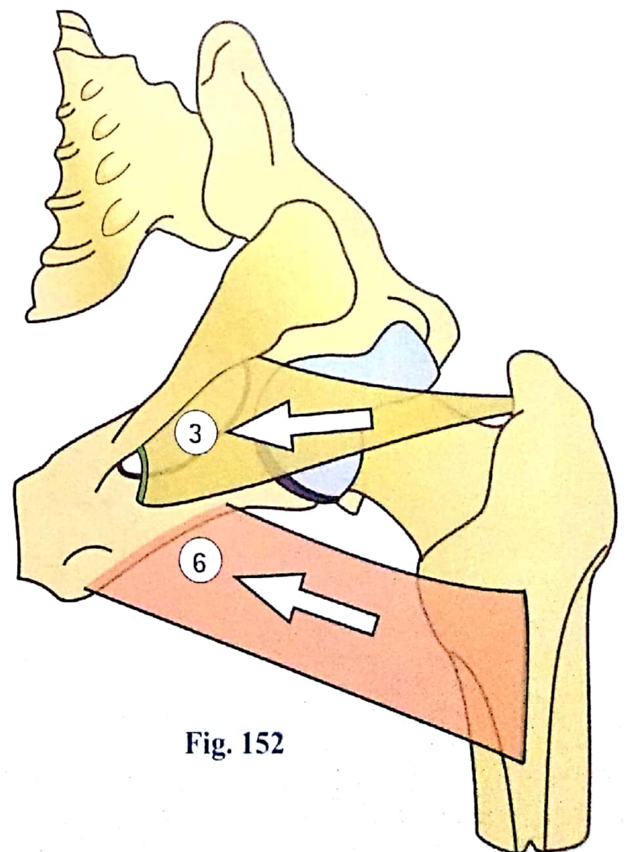


Fig. 152

Les muscles rotateurs de la hanche

La **coupe horizontale (Fig. 153)** passant un peu au-dessous du niveau de la tête fémorale montre la composante de rotation des ischio-jambiers et des adducteurs La projection horizontale de la longue portion du muscle biceps fémoral **1**, du muscle semitendineux, du muscle semimembraneux **2** et du muscle grand adducteur **3** et même du muscle long adducteur et du muscle court adducteur **4**, passe en arrière de l'axe vertical : ces muscles sont donc rotateurs externes **RE** lorsque le membre inférieur tourne autour de son axe mécanique longitudinal **(Fig. 49)**, c'est-à-dire genou étendu, hanche et pied servant de pivot. Il est à noter en outre qu'en rotation interne **RI**, le trajet d'une partie des adducteurs **4** passe *en avant de l'axe vertical* et qu'ils deviennent de ce fait des *rotateurs internes*.

Les rotateurs internes sont beaucoup *moins nombreux* que les rotateurs externes et leur puissance est trois fois moindre (54 kgm pour les rotateurs internes contre 146 kgm pour les rotateurs externes). Le trajet de ces muscles passe *en avant de l'axe vertical de la hanche*. La **coupe horizontale (Fig. 154)** montre les trois muscles rotateurs internes de la hanche :

- le muscle **moyen fessier 5**, par ses faisceaux antérieurs seulement ;
- le muscle **petit fessier 6**, rotateur interne dans sa presque totalité ;
- le mucle **tenseur du fascia lata 7**, qui se dirige vers l'*épine iliaque antéro-supérieure* **E**.

Pour une **rotation interne modérée** de 30 à 40° **(Fig. 155)**, le trajet du muscle obturateur externe **8** et du muscle pectiné se projette exactement au-dessous du centre de l'articulation ; ces deux muscles ne sont donc plus rotateurs externes. Les muscles **petit et moyen fessiers 6** sont encore rotateurs internes.

Par contre, dans une **rotation interne totale (Fig. 156)**, le muscle **obturateur externe 8** et le muscle **pectiné** deviennent rotateurs internes, puisque maintenant leur trajet passe en avant de l'axe vertical, tandis que le muscle **tenseur du fascia lata 7** et les muscles **petit et moyen fessiers 5** deviennent rotateurs externes. Ceci n'est valable que lorsque la rotation interne est poussée à son amplitude extrême ; c'est un exemple de l'*inversion des actions musculaires* en fonction de la position de l'articulation, due au changement de l'orientation des fibres musculaires, dont la **vue perspective antéro-supéro-externe (Fig. 157)** rend bien compte : la hanche étant en rotation interne forcée, les muscles **obturateur externe 8** et **pectiné 9** passent en avant de l'axe vertical **(double flèche)** tandis que les **petit** et **moyen fessiers 5** prennent une direction oblique en haut et en arrière.

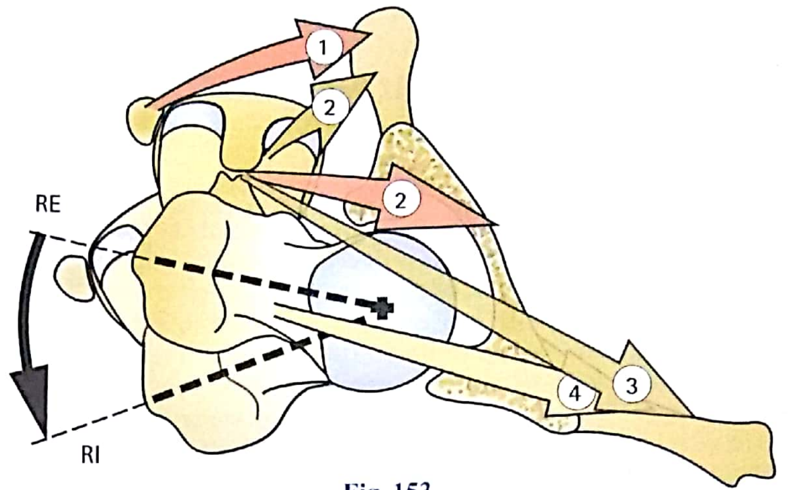


Fig. 153

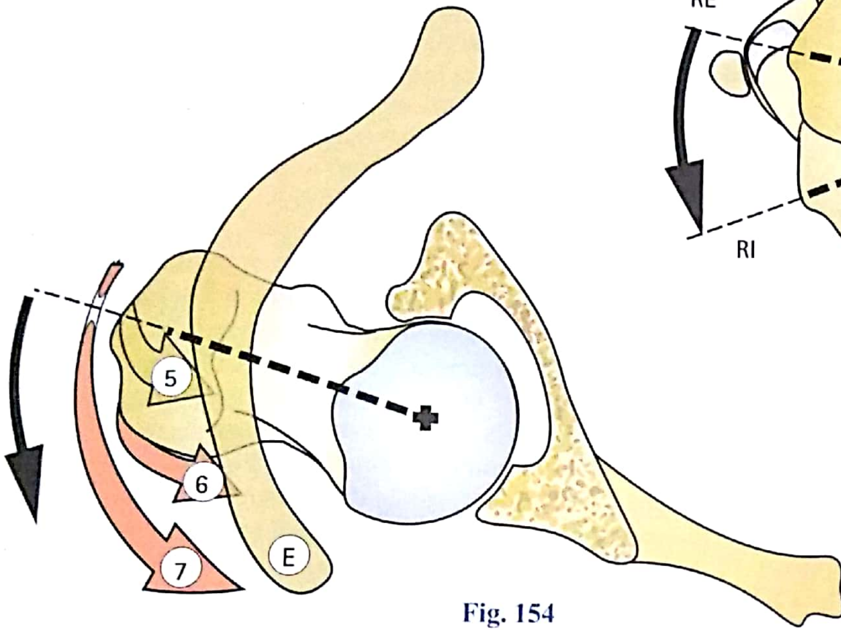


Fig. 154

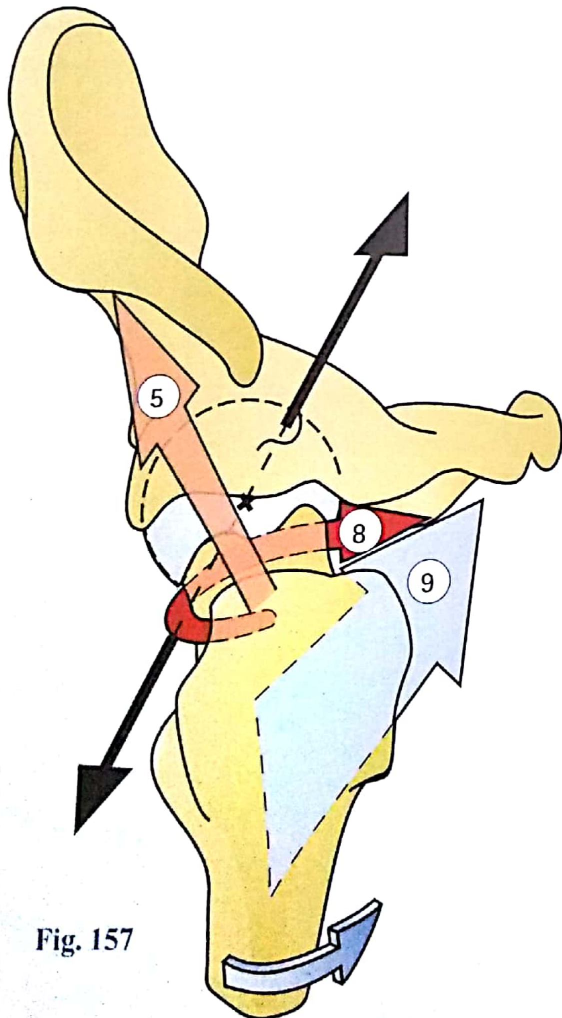


Fig. 157

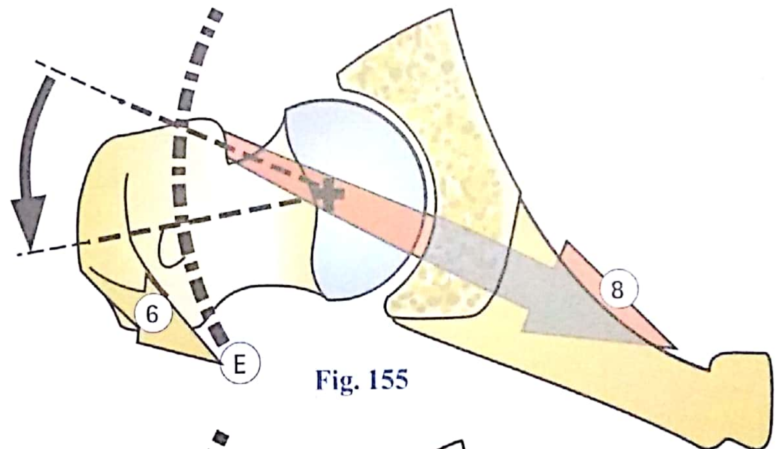


Fig. 155

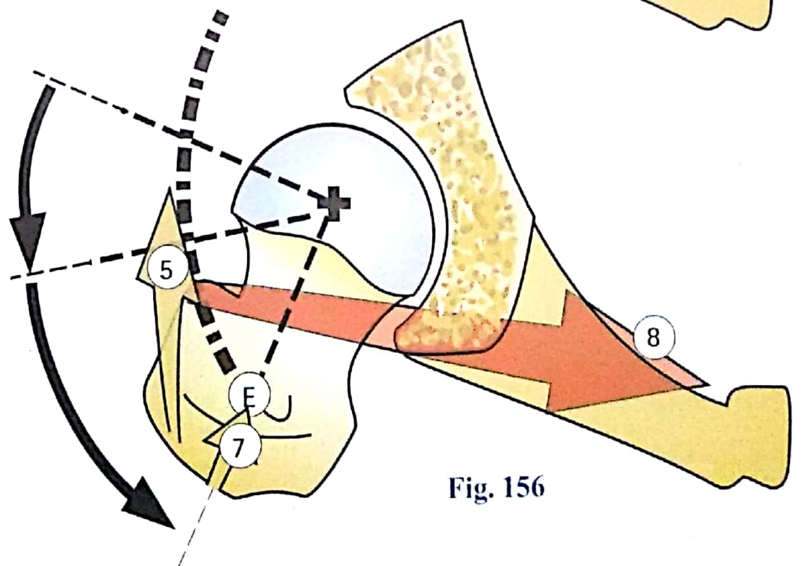


Fig. 156

L'inversion des actions musculaires

Les muscles moteurs d'une articulation à trois degrés de liberté ne peuvent pas avoir la même action quelle que soit la position de l'articulation ; les actions secondaires sont amenées à changer et même s'inverser. L'exemple le plus typique est l'**inversion de la composante de flexion des adducteurs (Fig. 158)** : à partir de la position de rectitude de **0°** *tous les adducteurs sont fléchisseurs* sauf les faisceaux postérieurs du muscle grand adducteur **G** qui est et reste extenseur jusqu'à l'extension – **20°**. Mais la composante de flexion ne persiste que tant que l'insertion supérieure de chaque muscle n'est pas dépassée : ainsi le muscle long adducteur **A** est *encore fléchisseur à* + **50°**, mais à partir de + **70°** *il devient extenseur*. De même le muscle court adducteur n'est fléchisseur que jusqu'à + **50°** après quoi *il devient extenseur* ; pour le muscle gracile, la limite de flexion est + **40°**.

Sur ce schéma, il apparaît nettement que seuls les fléchisseurs peuvent pousser le mouvement de flexion jusqu'à ses limites : pour + **120°** le muscle tenseur du fascia lata **T** vient d'épuiser sa course, car il s'est raccourci de la distance **aa'** égale à la moitié de la longueur de ses fibres. Quant au muscle psoas **P**, il arrive lui aussi près de sa limite d'efficacité car *son tendon a tendance à décoller de l'éminence ilio-pectinée*. Ce schéma fait comprendre pourquoi le petit trochanter **p** est *situé très en arrière* : le tendon du psoas possède ainsi une *course supplémentaire* égale au diamètre de la diaphyse fémorale.

Pour le muscle carré fémoral, l'inversion de la composante de flexion est tout aussi nette **(Fig. 159 : l'os iliaque, transparent, laisse voir le fémur et le trajet du carré fémoral)** : en *extension* **E**, le carré fémoral est fléchisseur **(flèche bleue)**, tandis qu'en *flexion* **F**, il devient extenseur **(flèche rouge)**, le point de transition correspondant à la position de rectitude.

L'efficacité des muscles dépend elle-même grandement de la position de l'articulation. La **flexion préalable (Fig. 160)** met les muscles extenseurs de la hanche sous tension : pour une flexion **F** de **120°**, le muscle grand fessier est passivement *allongé d'une longueur* **ff'** qui, pour certaines fibres, atteint 100 % ; pour leur compte, les ischio-jambiers sont *allongés d'une longueur* **jj'** voisine de 50 % de leur longueur en rectitude, à condition que le genou reste en extension. Ceci explique la **position de départ des coureurs (Fig. 161)** : flexion de la hanche au maximum, suivie d'extension du genou (deuxième temps non figuré ici) mettant les extenseurs de la hanche dans un état de tension favorable à la puissante impulsion du départ. C'est cette tension des ischio-jambiers qui limite la flexion de la hanche lorsque le genou reste étendu.

Le schéma **(Fig. 160)** montre en outre que de la position de rectitude à la position d'extension à – 20°, la variation de longueur **jj"** des ischio-jambiers est faible : cela confirme la notion que *l'efficacité optimum des ischio-jambiers se situe dans la position de demi-flexion de la hanche.*

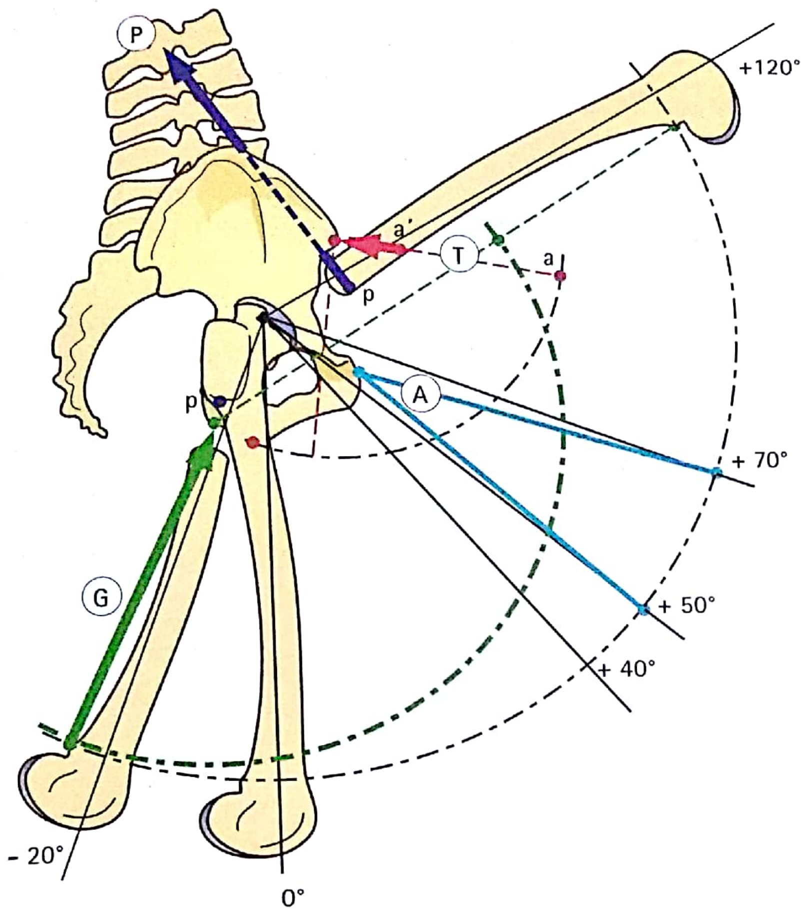


Fig. 158

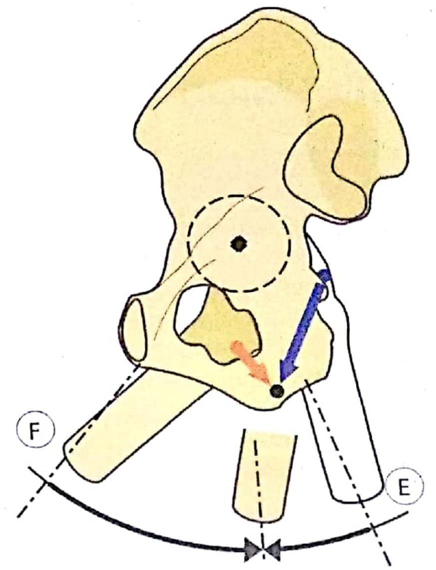


Fig. 159

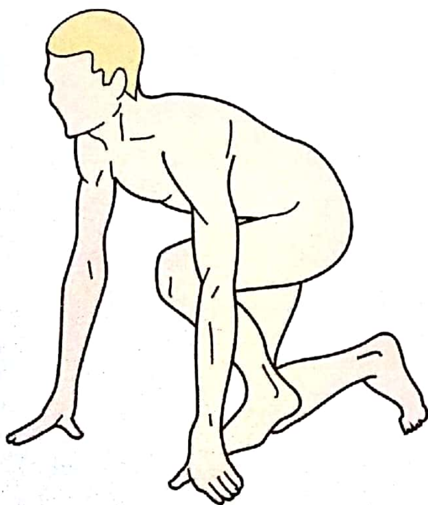


Fig. 161

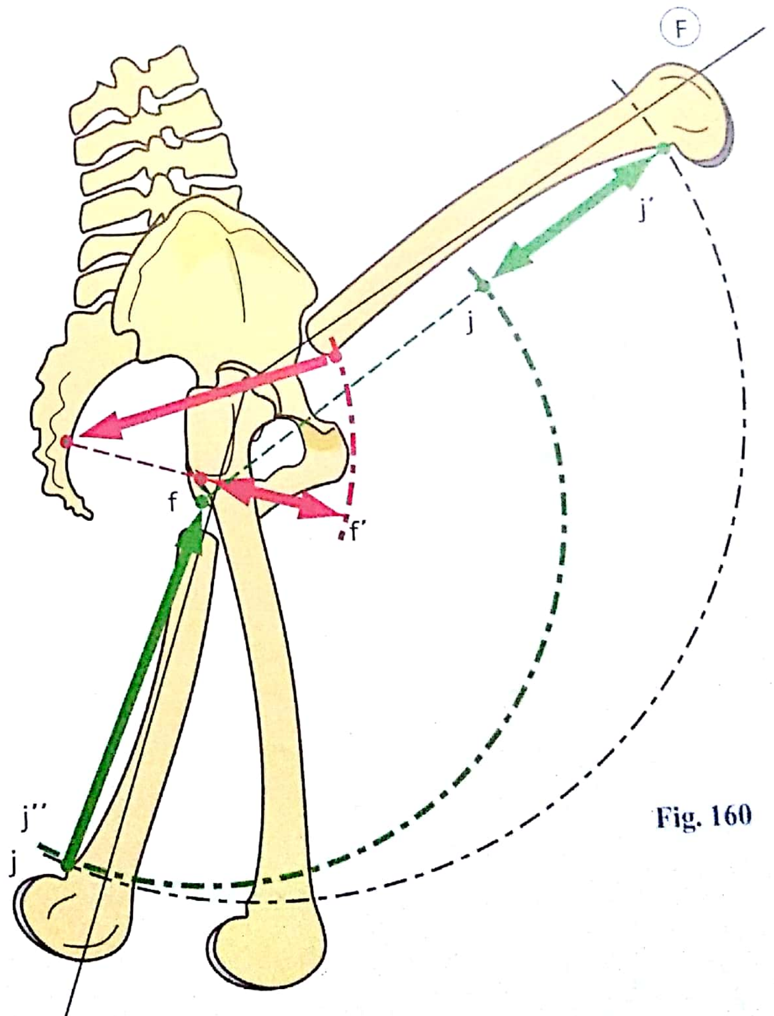


Fig. 160

L'inversion des actions musculaires *(suite)*

En position de **flexion accentuée de la hanche (Fig. 162)**, le muscle piriforme voit ses actions modifiées **(Fig. 163 : vue postéro-externe)** : alors qu'en rectitude, il est rotateur externe-fléchisseur-abducteur **(flèche rouge)**, en flexion accentuée il devient **(flèche bleue)** rotateur interne-extenseur-abducteur ; la *transition* entre ces deux zones d'action se situant vers la position de *flexion à 60° pour laquelle il n'est qu'abducteur*.

En **flexion accentuée** toujours **(Fig. 164 : vue postéro-externe de la hanche fléchie)**, non seulement le muscle piriforme **1** est abducteur, mais encore le muscle obturateur interne **2** le devient, de même que la totalité du muscle grand fessier **3**. L'action de ces muscles permet ainsi sur les *hanches fléchies à 90°* d'écarter les deux genoux l'un de l'autre **(flèche bleue)** et d'effectuer une rotation externe **(flèche verte)**. Le muscle petit fessier **4** est très nettement rotateur interne **(flèche rouge)** et devient adducteur **(Fig. 165)** de même que le muscle tenseur du fascia lata **5**. Le mouvement global réalisé est une flexion-adduction-rotation interne **(Fig. 166)**.

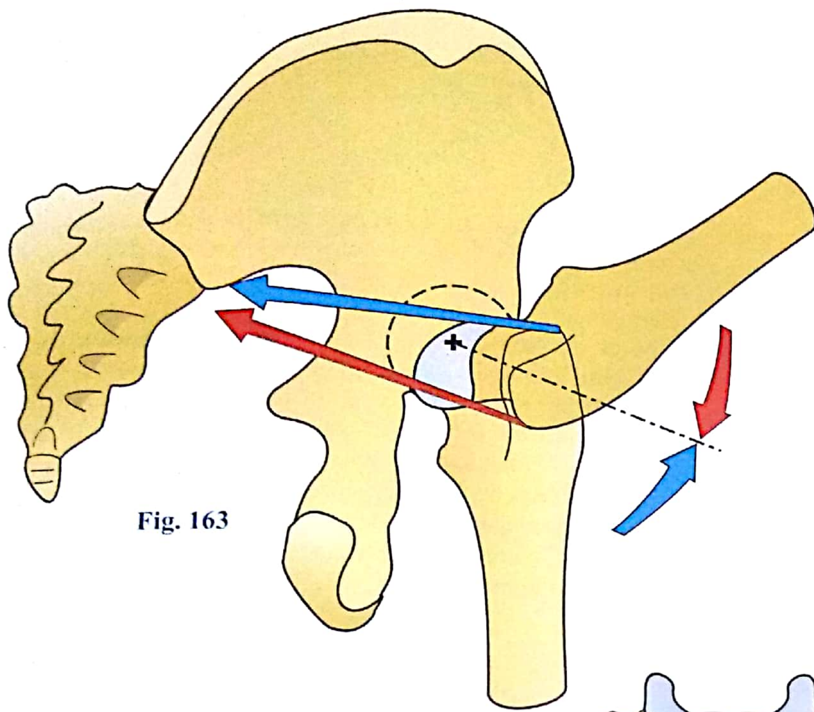


Fig. 163

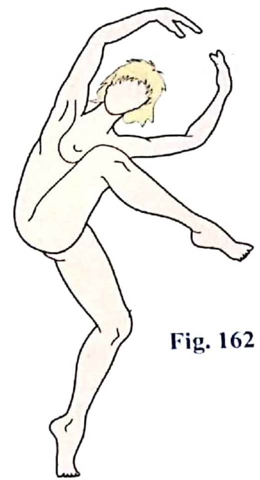


Fig. 162

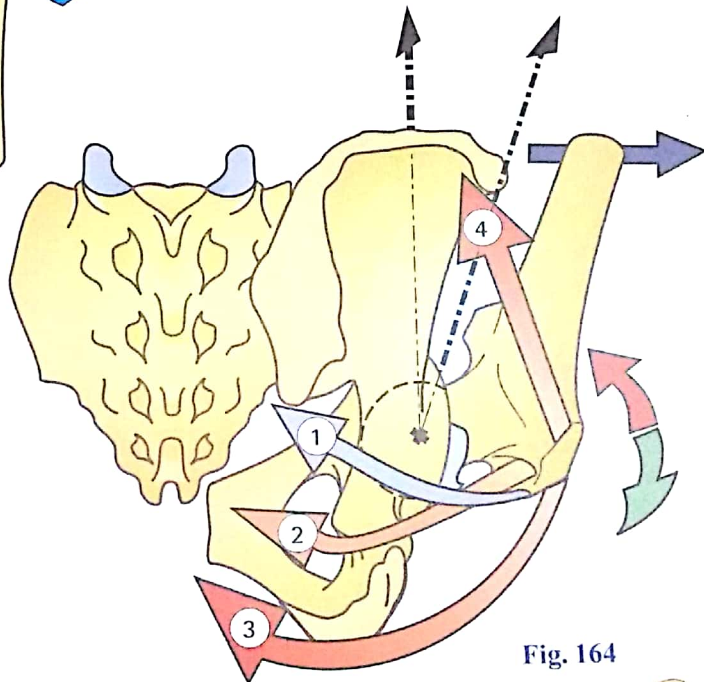


Fig. 164

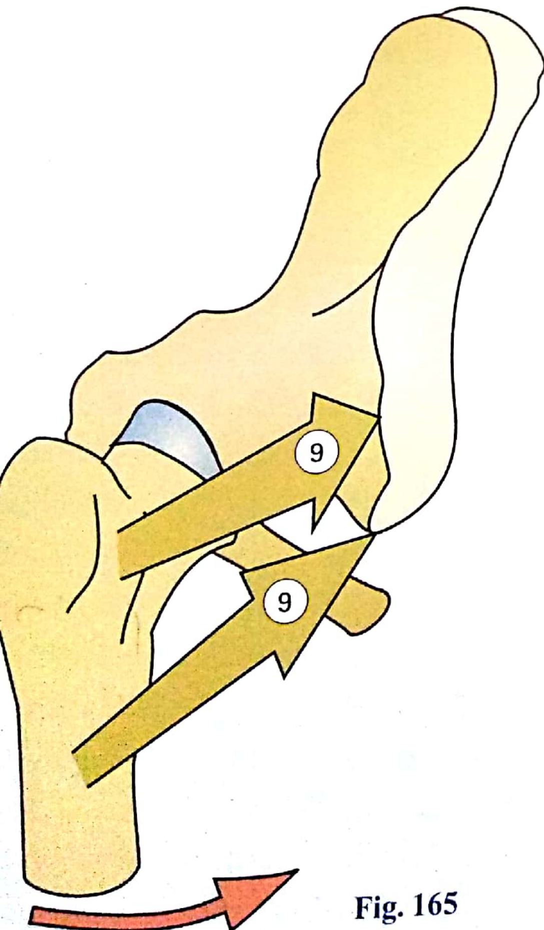


Fig. 165

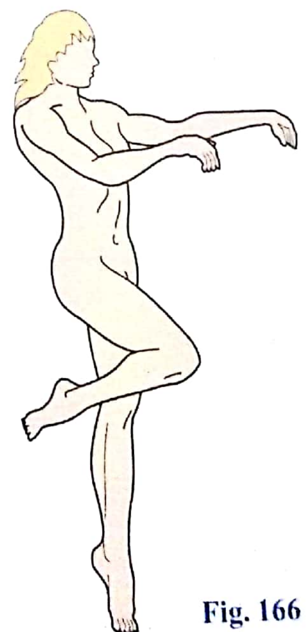


Fig. 166

Mise en jeu successive des abducteurs

Suivant le degré de flexion de la hanche, le bassin, en appui unilatéral, est stabilisé par des muscles abducteurs différents.

La hanche étant en **extension** complète, c'est-à-dire en rectitude, position zéro **(Fig. 167)**, le centre de gravité tombe en arrière de la ligue des hanches et la bascule postérieure du bassin est empêchée par la tension du ligament ilio-fémoral (voir aussi p. 31) et la contraction du muscle tenseur du fascia lata **1**, qui est en même temps fléchisseur de la hanche : *le tenseur corrige donc à la fois la bascule latérale et la bascule postérieure du bassin*. Comme abducteur, le muscle tenseur du fascia lata agit en *synergie* avec le faisceau superficiel du grand fessier **2** avec lequel il constitue, rappelons-le, le *deltoïde fessier*.

Le bassin étant un peu **moins basculé en arrière (Fig. 168)**, le centre de gravité tombe encore en arrière de la ligne des hanches et le muscle petit fessier **3** commence à entrer en action : remarquez que ce muscle est lui aussi abducteur-fléchisseur, comme le tenseur.

Lorsque le bassin est **équilibré dans le plan antéro-postérieur (Fig. 169)**, le centre de gravité tombe sur la ligne des hanches et c'est le muscle moyen fessier **4** qui stabilise le bassin latéralement.

À partir du moment où le bassin **bascule en avant**, on voit intervenir le muscle grand fessier, auquel s'ajoutent successivement le faisceau profond du muscle grand fessier **5**, le muscle piriforme **6 (Fig. 170)** et le muscle obturateur interne **(Fig. 171)**. À tous les moments de ce processus, y compris en flexion extrême de la hanche **(Fig. 172)**, le muscle grand fessier **2** agit en *antagonisme-synergie* avec le muscle tenseur du fascia lata **1**, comme abducteur, et aussi comme modérateur de la flexion de la hanche.

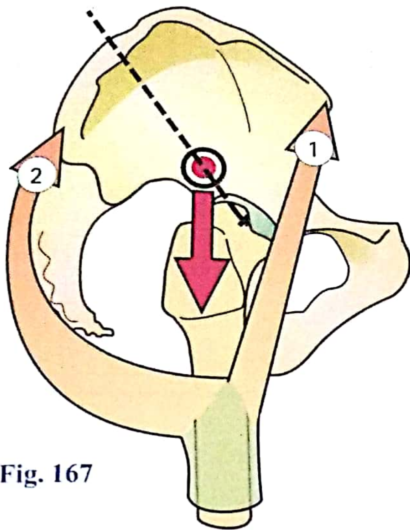


Fig. 167

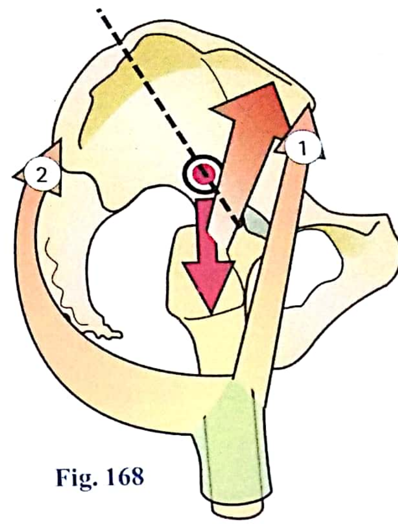


Fig. 168

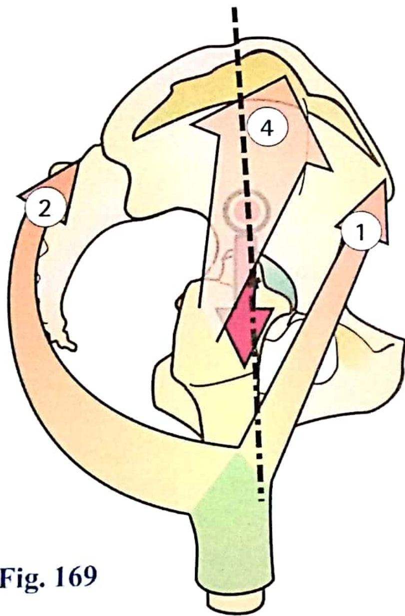


Fig. 169

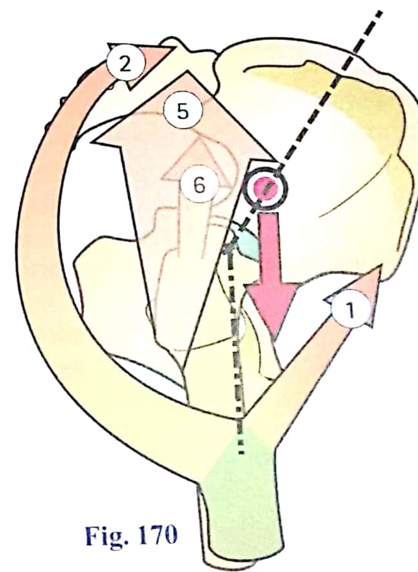


Fig. 170

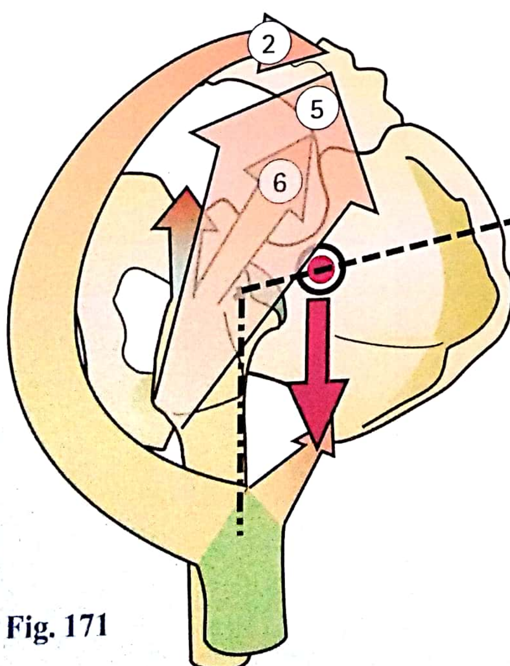


Fig. 171

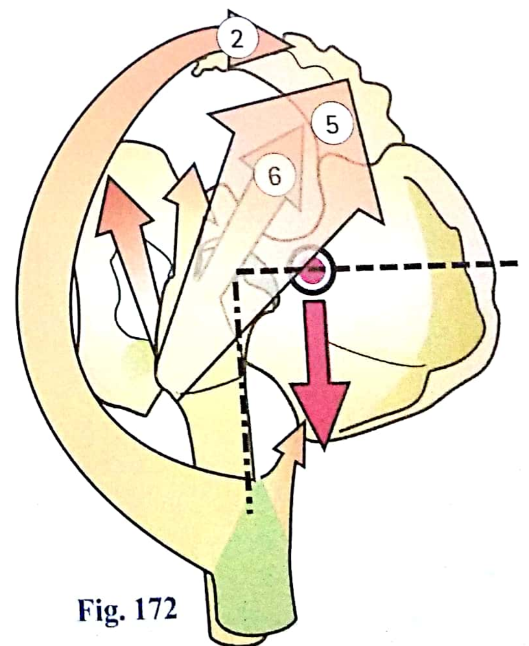


Fig. 172

Chapitre 2

LE GENOU

Le genou est **l'articulation intermédiaire** du membre inférieur.

C'est **principalement** une articulation à *un degré de liberté* – la flexion-extension – qui lui permet de *rapprocher ou d'éloigner* plus ou moins l'extrémité du membre de sa racine, ou, ce qui revient au même, de *contrôler la distance du corps par rapport au sol*. Le genou travaille essentiellement en **compression**, sous l'action de la pesanteur.

Accessoirement, l'articulation du genou comporte un *deuxième degré de liberté* : la rotation sur l'axe longitudinal de la jambe, qui n'apparaît que lorsque le *genou est fléchi*.

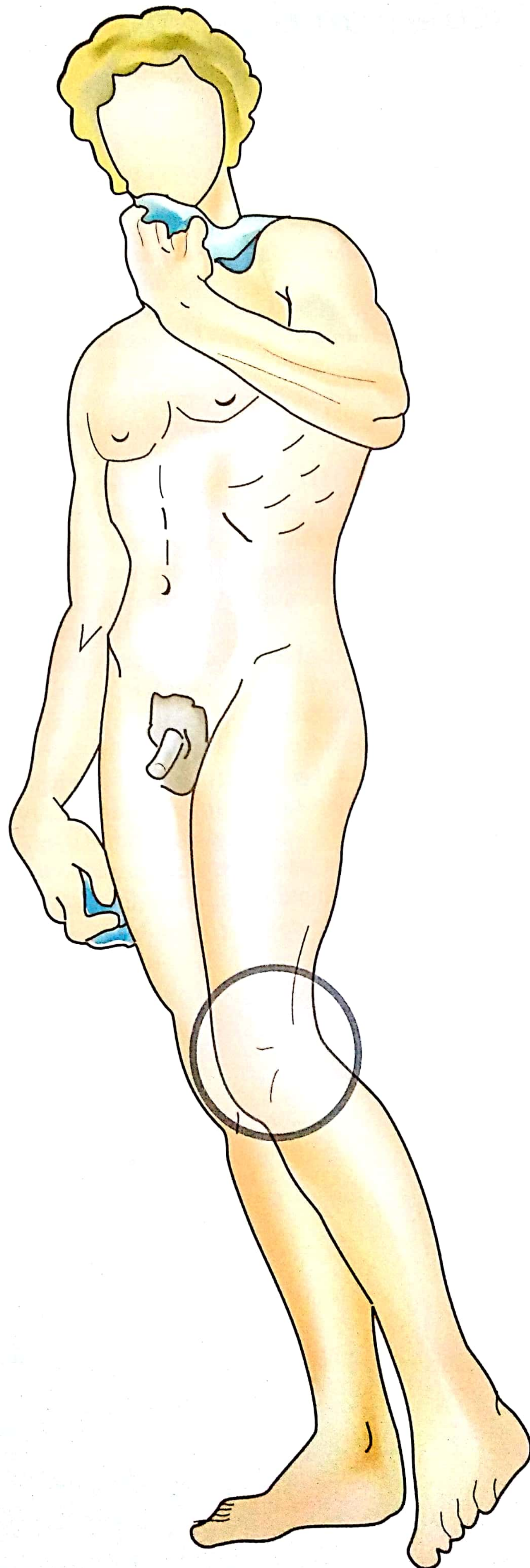
Envisagée sous l'angle mécanique, l'articulation du genou est un *défi mécanique* : elle doit concilier *deux impératifs contradictoires* :

- posséder une *grande stabilité en extension complète*, position dans laquelle le genou subit d'importants efforts dus au poids du corps et à la longueur des bras de levier ;
- acquérir une *grande mobilité en flexion*, mobilité nécessaire à la course et à *l'orientation optimum du pied* par rapport aux inégalités du terrain.

Le genou résout ces problèmes grâce à des dispositifs mécaniques extrêmement *ingénieux*, cependant le *faible emboîtement des surfaces*, condition nécessaire d'une grande mobilité, l'expose aux *entorses et aux luxations*.

C'est en **flexion**, position d'instabilité, que le genou est exposé au maximum aux *lésions ligamentaires et méniscales*.

C'est en **extension** qu'il est le plus vulnérable aux *fractures articulaires et aux ruptures ligamentaires*.



Les axes de l'articulation du genou

Le **premier degré de liberté** est conditionné par *l'axe transversal* **XX' (Fig. 1, vue antéro-interne et Fig. 2, vue antéro-externe du genou demi-fléchi)** autour duquel s'effectuent les mouvements de flexion-extension, dans un plan sagittal. Cet axe **XX'**, contenu dans un plan frontal, traverse horizontalement les condyles fémoraux.

En raison du décalage dû à la longueur du col fémoral **(Fig. 3 : vue d'ensemble du squelette des membres inférieurs)**, l'axe longitudinal de la diaphyse fémorale n'est pas situé exactement dans le prolongement de l'axe du squelette jambier ; il forme donc avec ce dernier un angle obtus ouvert en dehors de 170-175° : c'est le **valgus physiologique** du genou.

Par contre, les trois centres articulaires de la hanche (**H**), du genou (**O**) et de la cheville (**C**) sont alignés sur une même droite **HOC**, qui est **l'axe mécanique du membre inférieur**. Au niveau de la jambe, cet axe est confondu avec l'axe du squelette ; par contre, à la cuisse, cet axe mécanique **HO** forme approximativement un angle de 6° avec l'axe du fémur.

D'autre part, du fait de l'écartement plus grand des hanches par rapport aux chevilles, l'axe mécanique de chaque membre inférieur est légèrement oblique en bas et en dedans, formant un angle de 3° avec la verticale. Cet angle est d'autant plus ouvert que le bassin est plus large, ce qui est le cas chez la femme. Cela explique aussi pourquoi *le valgus physiologique du genou est plus marqué chez la femme que chez l'homme.*

L'axe de flexion-extension **XX'** étant *horizontal,* il n'est pas confondu avec la bissectrice **Ob** de l'angle de valgus : on compte 81° entre **XX'** et l'axe du fémur, et 93° entre **XX'** et l'axe de jambe. Il s'ensuit que lors de la flexion complète, l'axe de jambe ne vient pas strictement en arrière de l'axe du fémur, mais plutôt *un peu en dedans*, ce qui déporte le talon vers le plan de symétrie : *la flexion extrême porte le talon au contact de la fesse au niveau de la tubérosité ischiatique.*

Le **deuxième degré de liberté** consiste dans la rotation autour de l'axe longitudinal **YY'** de la jambe **(Fig. 1 et 2)**, tout à fait évidente sur le genou étant fléchi. La construction du genou rend en effet cette **rotation impossible lorsque le genou est en extension complète** ; l'axe de jambe est alors confondu avec l'axe mécanique du membre inférieur et *la rotation axiale s'effectue non plus dans le genou, mais dans la hanche qui supplée le genou.*

Sur les figures 1 et 2, on a figuré un axe **ZZ'** antéro-postérieur et perpendiculaire aux deux précédents. Cet axe ne représente pas vraiment un troisième degré de liberté, mais, grâce au jeu mécanique, dû à la détente des ligaments latéraux, il permet, *lorsque le genou est fléchi*, de *faibles mouvements de latéralité* d'un à deux centimètres à la cheville ; par contre, en extension complète, ces mouvements de latéralité disparaissent complètement du fait de la tension des ligaments latéraux. Lorsqu'ils existent, ils doivent être considérés comme pathologiques et traduisent une lésion des ligaments latéraux.

Il faut pourtant savoir que des mouvements de latéralité apparaissent normalement dès qu'on commence à fléchir le plus légèrement possible le genou ; pour savoir s'ils sont pathologiques, il est indispensable de les comparer à ceux du côté opposé, à condition, bien évidemment, qu'il soit sain.

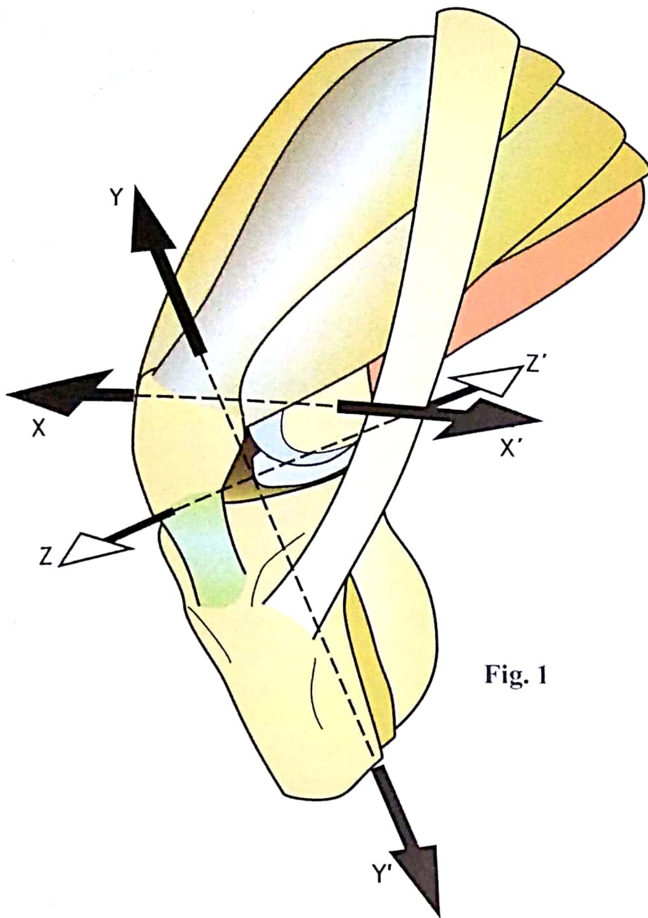


Fig. 1

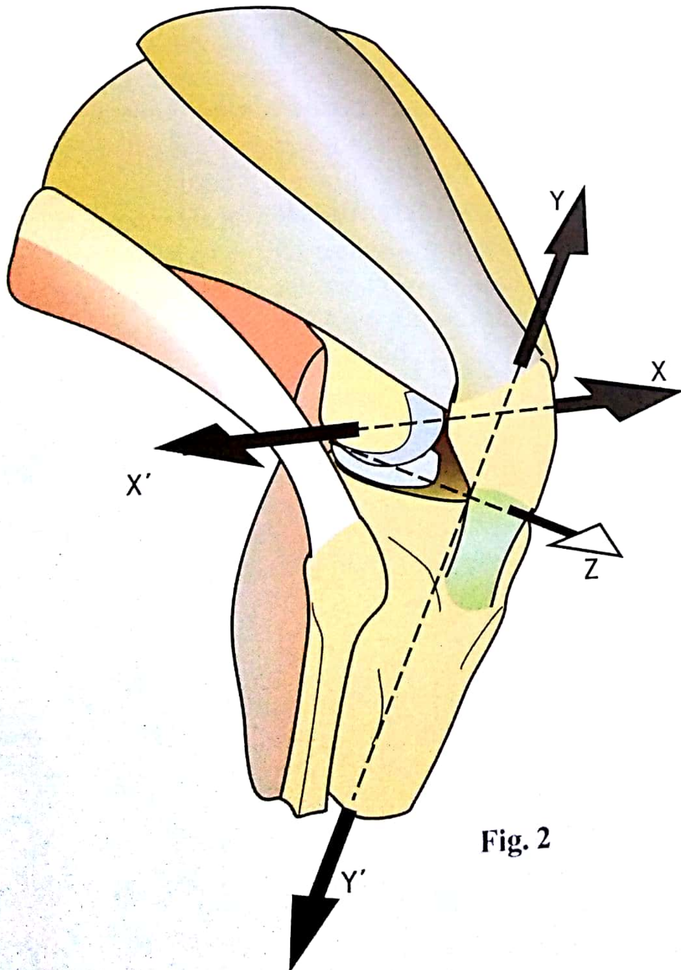


Fig. 2

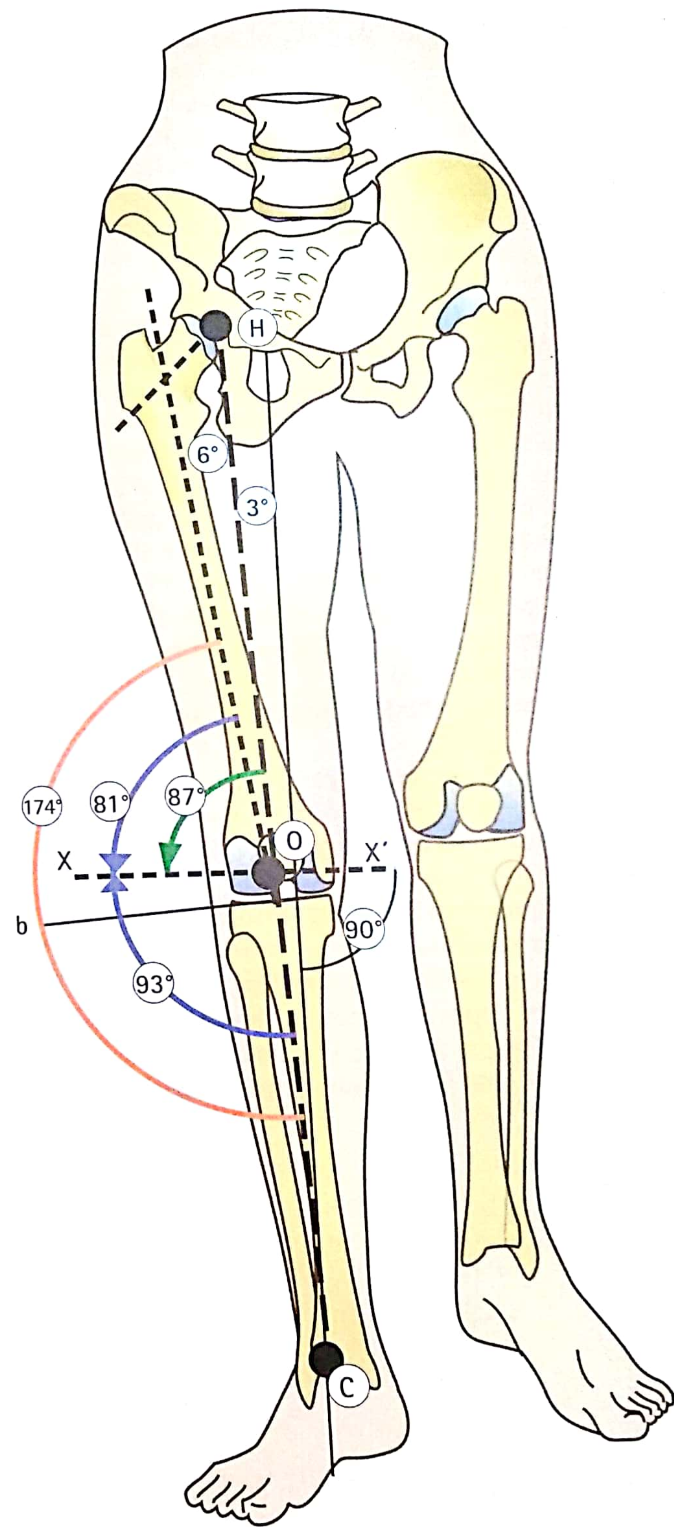


Fig. 3

Les déviations latérales du genou

Outre ses variations physiologiques suivant le sexe, l'angle de valgus subit des **variations pathologiques** suivant les individus (**Fig. 4 : vue de face du squelette des membres inférieurs**).
L'inversion de l'angle de valgus par déport externe (**flèche rouge**) crée un **genu varum** (genou gauche : **Var** de la **Fig. 4**) : on dit communément que le sujet qui en est atteint est *bancal* (**Fig. 6**) ; le centre du genou, matérialisé par l'incisure de l'éminence intercondylaire sur le tibia et la fosse intercondylaire sur le fémur, est déporté en dehors.
Le genu varum peut s'apprécier de deux manières :

- soit par la mesure de l'*angle formé par les deux axes diaphysaires du fémur et du tibia* : il est plus grand que sa valeur physiologique de 170°, par exemple 180 ou 185°, ce qui représente une inversion de l'angle obtus ;
- soit par la **mesure du déport externe e** (**Fig. 5**) du centre du genou par rapport à l'axe mécanique du membre inférieur, par exemple 10-15 ou 20 mm. On note alors DE = 15 mm.

À l'inverse, le **genu valgum** correspond à une fermeture de l'angle de valgus par déport interne (**flèche bleue**), ce qui se voit sur le genou droit de la figure 4 : le sujet qui en est atteint est dit *cagneux* (**Fig. 8**).
Là encore, deux méthodes sont possibles pour apprécier le genu valgum :

- soit par la mesure de l'*angle formé par les deux axes diaphysaires du fémur et du tibia*, dont la valeur se situe alors au-dessous de l'angle physiologique de 170°, par exemple 165° ;
- soit par la **mesure du déport interne i** (**Fig. 7**) du centre du genou par rapport à l'axe mécanique du membre inférieur, par exemple 10-15 ou 20 mm. On note alors DI = 15 mm.

La **mesure du déport externe ou interne est plus rigoureuse** que celle de l'angle de valgus, mais elle nécessite d'excellents **clichés d'ensemble des membres inférieurs** dits « de gonométrie » (**Fig. 4**). Sur ce schéma, malchance exceptionnelle, le sujet présente un genu valgum à droite et un genu varum à gauche. Dans la majorité des cas, la déformation est semblable et bilatérale, mais pas obligatoirement symétrique, un genou pouvant être plus dévié que l'autre. Il existe cependant des cas très rares de déviation en « coup de vent », les deux genoux dans le même sens, comme sur le schéma. C'est une situation très inconfortable, car elle entraîne un déséquilibre du côté du genu valgum. On peut observer ce cas après une ostéotomie de correction qui dépasse son but : on a hyper-corrigé un genu varum en genu valgum. Il faut alors rapidement rétablir l'équilibre par une deuxième opération.
Les déviations latérales des genoux ne sont pas sans conséquence car, avec le temps, elles sont génératrices d'arthrose. En effet, les charges ne sont plus également réparties entre les compartiments externe et interne du genou ; il s'ensuit une usure prématurée du compartiment interne, **arthrose fémoro-tibiale interne, dans le genu varum**, ou, par le même mécanisme, une **arthrose fémoro-tibiale externe dans le genu valgum**. On peut alors être amené à faire, dans le premier cas, *une ostéotomie de valgisation tibiale* (ou fémorale) et dans le deuxième cas, *une ostéotomie de varisation tibiale* (ou fémorale).
C'est en prévision de telles éventualités qu'on accorde maintenant beaucoup d'importance à la **surveillance des déviations latérales des genoux chez les jeunes enfants**. Il est de fait que le genu valgum bilatéral est très fréquent chez les jeunes enfants et qu'il s'estompe progressivement avec la croissance. Mais il faut néanmoins suivre cette évolution favorable par des clichés d'ensemble des membres inférieurs, car s'il persistait une déviation notable à la fin de l'enfance, il faudrait envisager une correction par **épiphysiodèse tibio-fémorale** interne en cas de genu valgum. Cette épiphysiodèse sera externe, en cas de genu varum, Ces opérations agissent en bloquant la croissance du côté du genou le plus « sorti » au profit du côté le plus « rentré ».

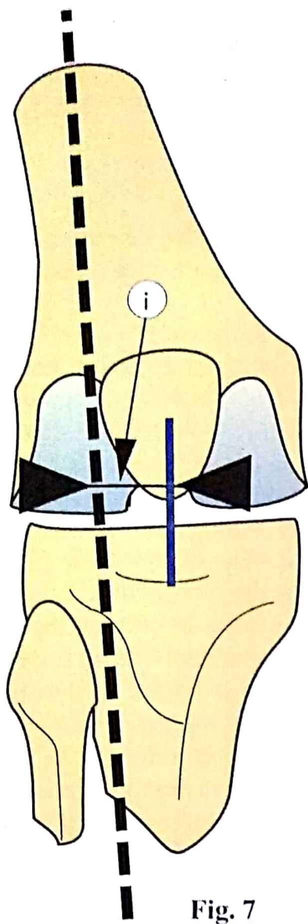


Fig. 7

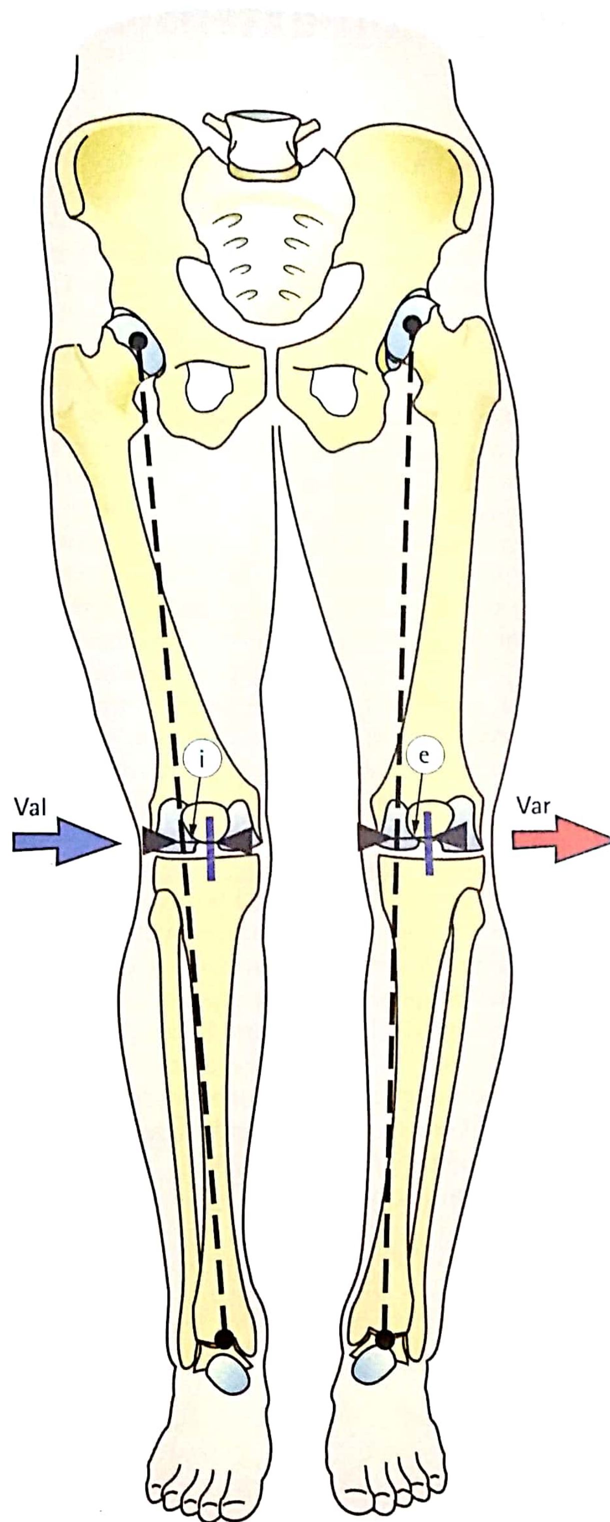


Fig. 4

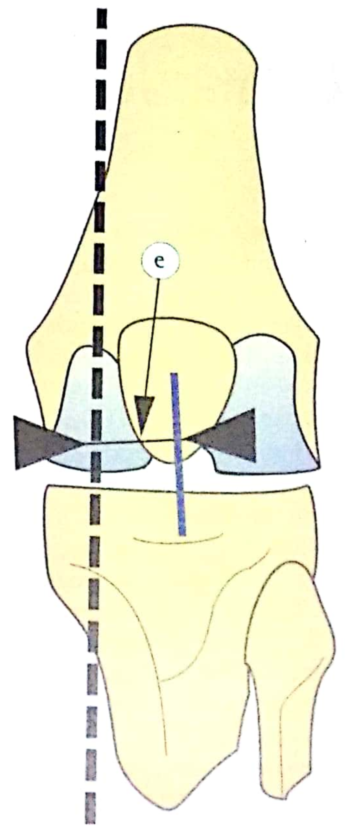
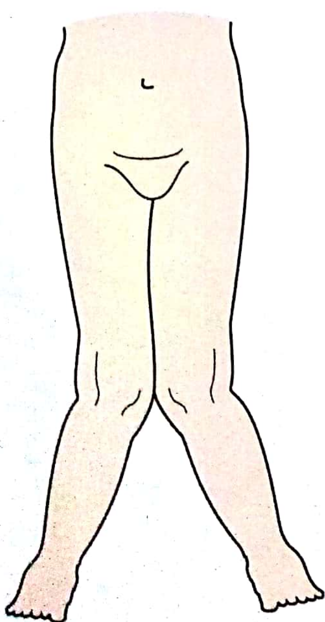
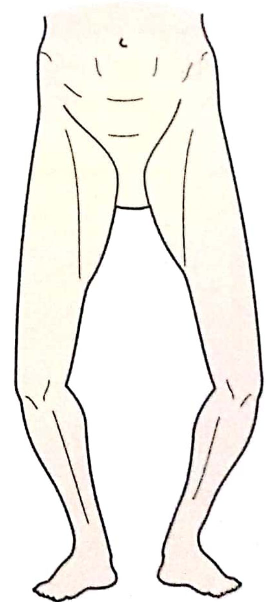


Fig. 5


Fig. 8


Fig. 6

Les mouvements de flexion-extension

La **flexion-extension est le mouvement principal du genou**. Son amplitude s'apprécie à partir de la position de référence définie comme suit : *l'axe de la jambe est situé dans le prolongement de l'axe de la cuisse* **(Fig. 9, jambe gauche)**. De profil, l'axe du fémur se continue sans aucune angulation avec l'axe du squelette jambier. C'est dans cette position de référence que le membre inférieur est le plus long.

L'extension se définit comme le *mouvement qui éloigne* la face postérieure de la jambe de la face postérieure de la cuisse. Il n'existe à vrai dire pas d'extension absolue, puisque dans la position de référence, le membre inférieur est déjà dans son état d'allongement maximum. Il est possible cependant d'effectuer, surtout passivement, un mouvement d'extension de 5 à 10° à partir de la position de référence **(Fig. 11)** ; on appelle « hyperextension » ce mouvement, qui, chez certains sujets, peut être pathologiquement exagérée, réalisant alors un *genu recurvatum*.

L'extension active dépasse rarement, et de peu, la position de référence **(Fig. 9)** et cette possibilité dépend essentiellement de la position de la hanche. En effet, l'efficacité du muscle droit, en tant qu'extenseur du genou, est d'autant plus grande que la hanche est elle-même en extension (voir p. 148). Ce qui veut dire que l'extension préalable de la hanche **(Fig. 10, jambe droite, celle qui est postérieure)**, prépare l'extension du genou.

L'extension relative est le mouvement qui complète l'extension du genou à partir de toute position de flexion **(Fig. 10, jambe gauche, celle qui est en avant)** ; c'est le mouvement qui s'effectue normalement lors de la marche quand le membre *oscillant* se projette vers l'avant pour prendre contact avec le sol.

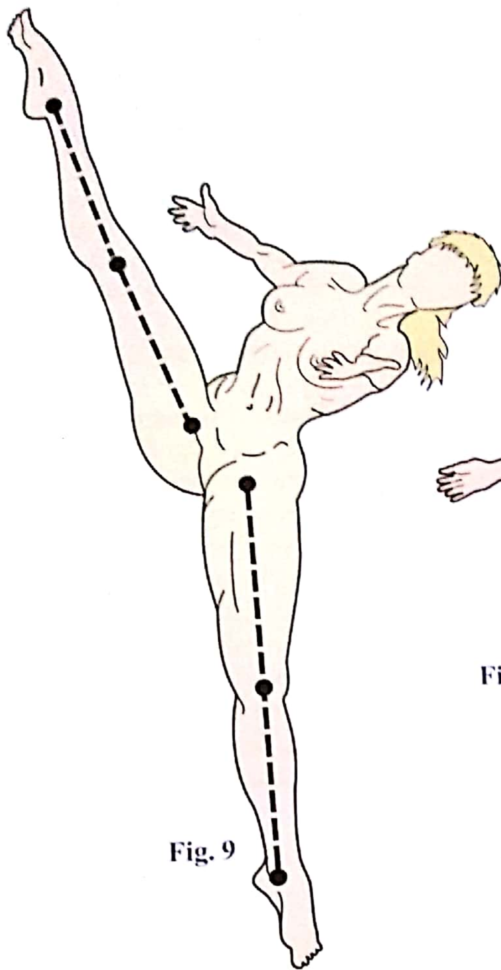
La flexion est le mouvement qui rapproche la face postérieure de la jambe de la face postérieure de la cuisse. Il existe des mouvements de *flexion absolue*, à partir de la position de référence, et des mouvements de *flexion relative*, à partir de toute position de flexion.

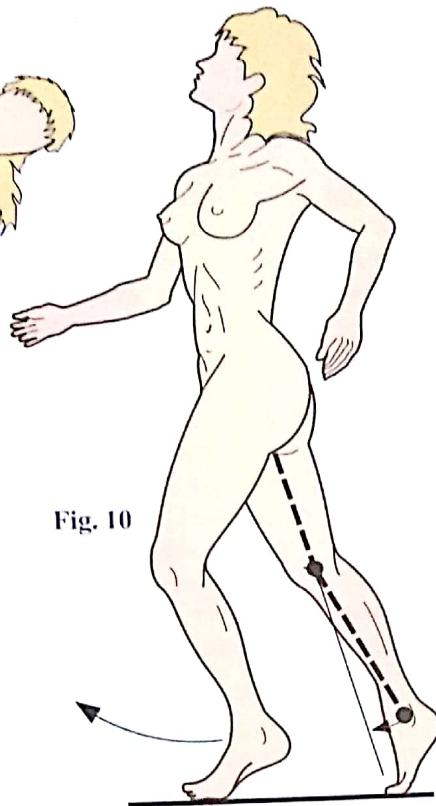
L'amplitude de flexion du genou est différente suivant la position de la hanche et suivant les modalités du mouvement lui-même.

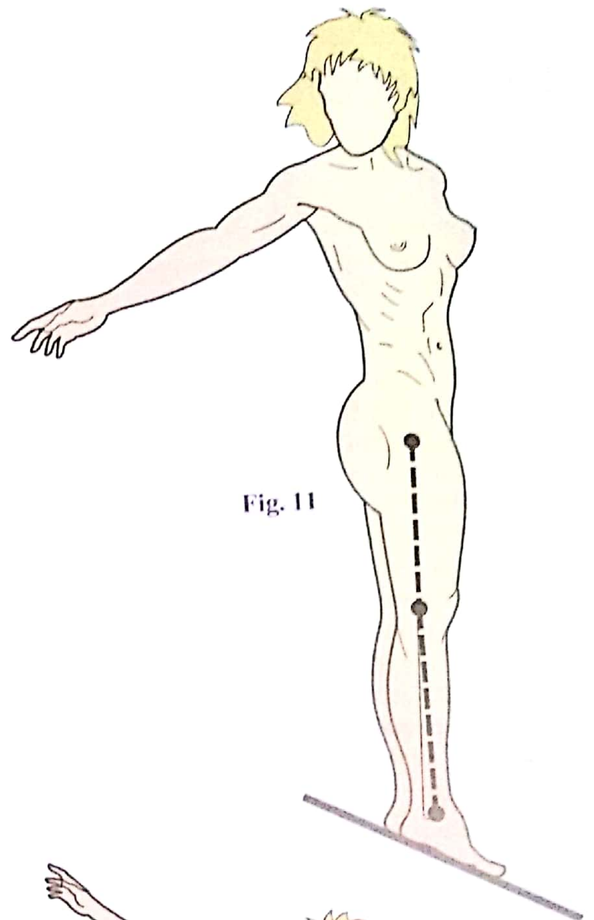
La flexion active atteint 140° si la hanche est fléchie au préalable **(Fig. 12)** et 120° seulement si la hanche est en extension **(Fig. 13)**. Cette différence d'amplitude tient à la diminution d'efficacité des ischio-jambiers lorsque la hanche est étendue (voir p. 150). Il est cependant possible de dépasser ces 120° de flexion du genou sur la hanche étendue, grâce à la *contraction balistique ou encore instantanée* des ischio-jambiers : ces muscles, se contractant brusquement et fortement, lancent la flexion du genou qui se termine comme une flexion passive.

La flexion passive du genou atteint une amplitude de 160° **(Fig. 14)** et permet au talon de prendre contact avec la fesse. Ce mouvement est un test très important de la liberté de flexion du genou. Pour apprécier l'amplitude de flexion passive du genou, on peut mesurer la distance qui sépare le talon de la fesse. En temps normal, la flexion n'est limitée que par le contact élastique des masses musculaires du mollet et de la cuisse. Pathologiquement, la flexion passive du genou est limitée par la rétraction de l'appareil extenseur – essentiellement le quadriceps – ou par les rétractions capsulaires (voir p. 108).

S'il est toujours possible d'apprécier un déficit de flexion en faisant la différence entre le degré de flexion atteint et l'amplitude de flexion maximum (160°), ou en appréciant la distance talon/fesse, le *déficit d'extension* se cote par un angle négatif. Par exemple, un *déficit de flexion* de – 60° est celui qu'on mesure entre la position d'extension passive maximum et la rectitude. Ainsi, sur la figure 13, on peut aussi bien dire que la jambe gauche est fléchie à 120°, ou, si elle ne peut atteindre une plus grande extension, qu'elle présente un déficit d'extension de – 120°.


Fig. 9


Fig. 10


Fig. 11

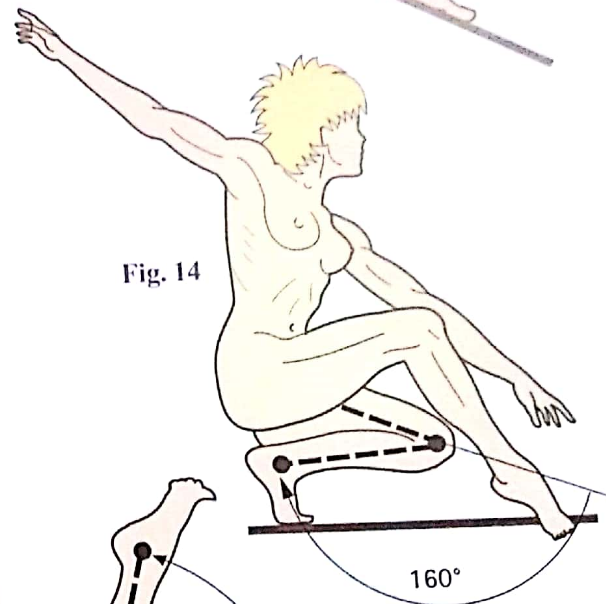


Fig. 14

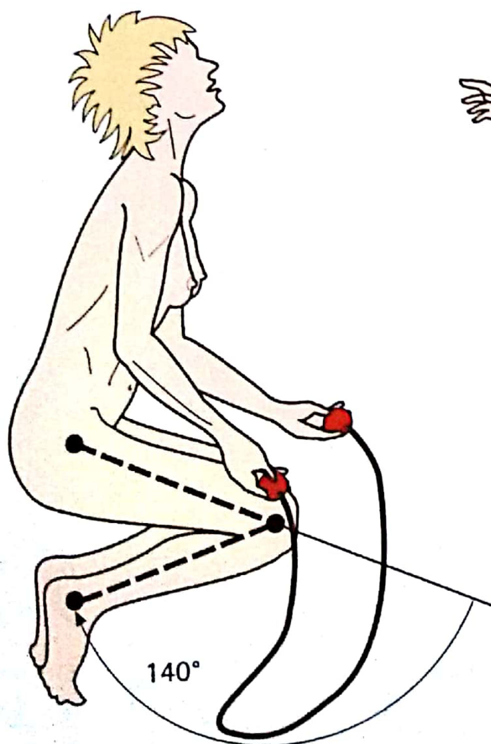


Fig. 12

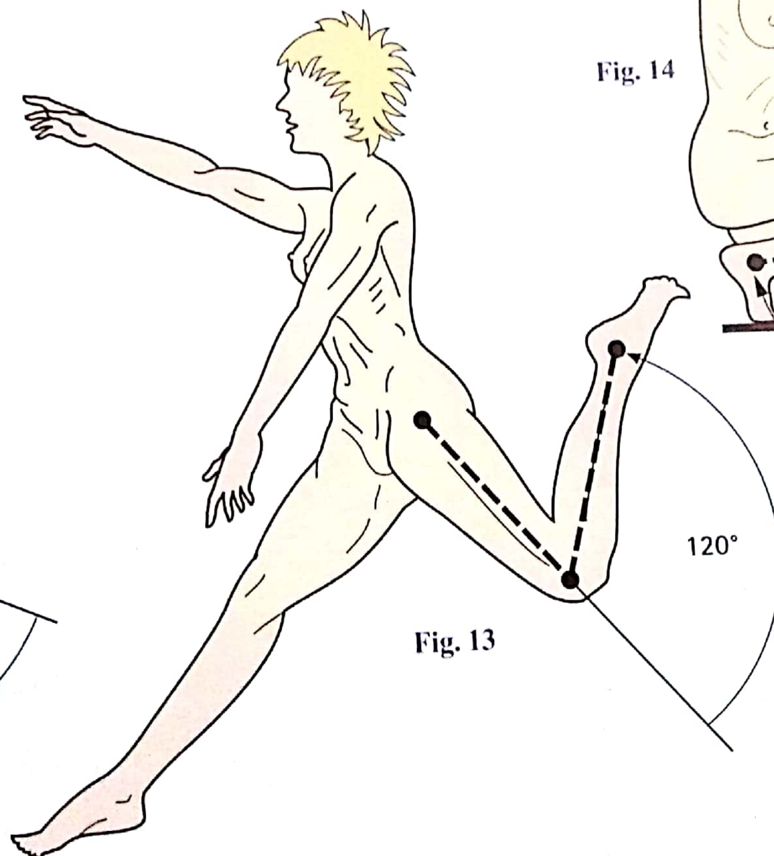


Fig. 13

La rotation axiale du genou

Le mouvement de **rotation de la jambe autour de son axe longitudinal** ne peut être effectué que *genou fléchi*, alors que, genou étendu, le verrouillage articulaire rend le tibia solidaire du fémur.

Pour mesurer la **rotation axiale active**, le genou doit être fléchi à angle droit, le sujet étant assis jambes pendantes au bord d'une table **(Fig. 15)** : la flexion du genou exclut la rotation de la hanche. Dans la position de référence, la pointe du pied est dirigée légèrement en dehors (voir p. 78).

La **rotation interne (Fig. 16)** porte la pointe du pied en dedans et intervient pour une part importante dans le mouvement d'adduction du pied (voir p. 180).

La **rotation externe (Fig. 19)** porte la pointe en dehors et intervient de même dans le mouvement d'abduction du pied.

Pour Fick, la rotation externe est de 40° contre 30° pour la rotation interne. Cette amplitude varie avec le degré de flexion puisque, toujours pour cet auteur, la rotation externe est de 32° lorsque le genou est fléchi à 30° et de 42° lorsqu'il est fléchi à angle droit.

La mesure de la **rotation axiale passive** s'effectue le sujet étant couché sur le ventre, *genou fléchi à angle droit*. Des deux mains, l'examinateur saisit le pied et le fait tourner en portant sa pointe en dehors **(Fig. 18)** et en dedans **(Fig. 19)**. Comme on peut s'y attendre, cette rotation passive est un peu plus ample que l'active.

Enfin, il existe une **rotation axiale dite « automatique »**, parce qu'elle est inévitable et involontaire : elle est *liée aux mouvements de flexion-extension*. Elle a lieu surtout en fin d'extension ou en début de flexion. Lorsque le genou se porte *en extension*, le pied se trouve porté en *rotation externe* **(Fig. 20)** : d'où un moyen mnémotechnique simple pour retenir cette association : extension = rotation externe. Inversement, lorsque le genou se porte *en flexion*, la jambe tourne en *rotation interne* **(Fig. 21)**.

Le même mouvement est réalisé lorsqu'en repliant les jambes sous le corps, la pointe du pied se porte automatiquement en dedans, ce qui correspond aussi à la *position fœtale*.

Nous étudierons plus loin le mécanisme de cette rotation automatique.

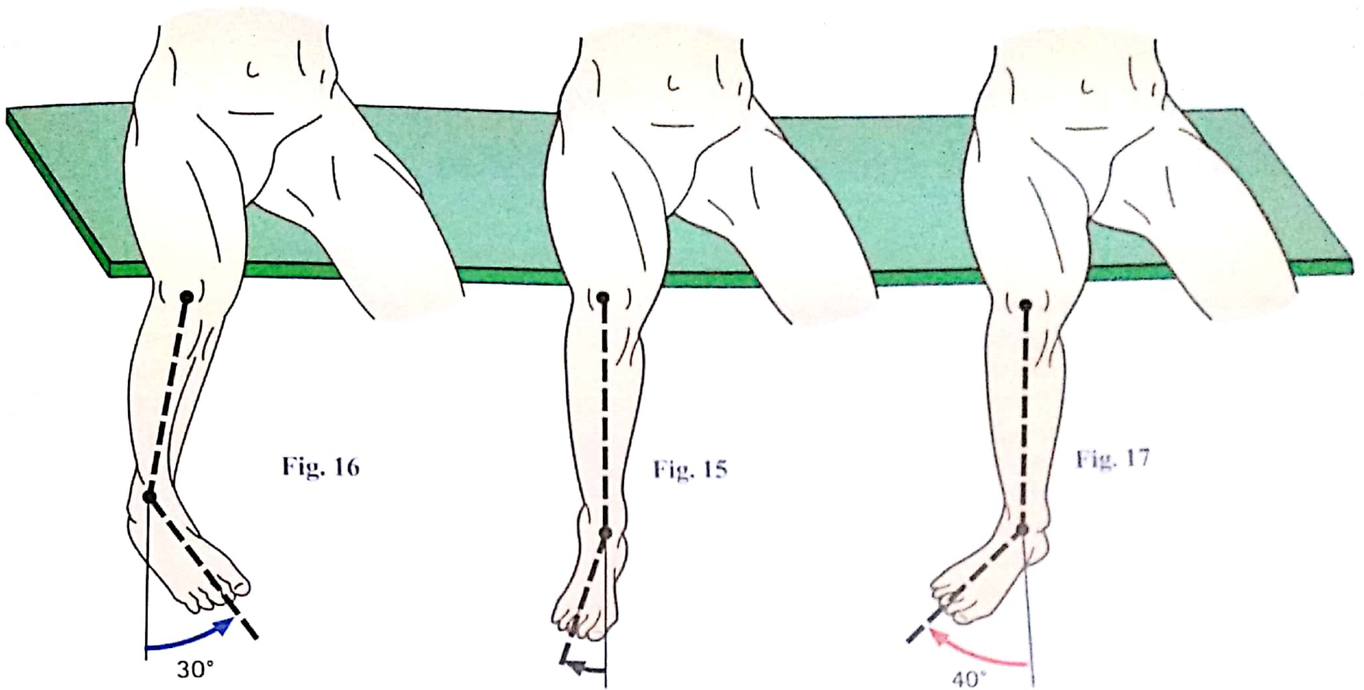


Fig. 16

Fig. 15

Fig. 17

45–50°

30–35°

Fig. 21

Fig. 20

Fig. 18

Fig. 19

Architecture générale du membre inférieur et orientation des surfaces articulaires

L'orientation des condyles fémoraux et des plateaux tibiaux favorise la flexion du genou. Deux extrémités osseuses mobiles l'une par rapport à l'autre **(Fig. 22)** se modèlent bien en fonction de leurs mouvements **(Fig. 23)**, suivant *l'expérience de Fick*. Cependant la flexion ne peut atteindre l'angle droit **(Fig. 24)**, à moins qu'on n'enlève un fragment **(Fig. 25)** au segment supérieur pour retarder la butée de surface inférieure. Le point faible ainsi créé sur le fémur est compensé par la transposition en avant de la diaphyse, ce qui *déjette des condyles vers l'arrière* **(Fig. 26)**. Symétriquement, le tibia est allégé en arrière et renforcé en avant **(Fig. 27)**, ce qui *déjette vers l'arrière la surface tibiale*.

Les **courbures générales des os du membre inférieur** traduisent les efforts qui leur sont appliqués. Elles se conforment aux *lois des « colonnes excentriquement chargées »* d'Euler (citées par Steindler).

Lorsqu'une colonne est articulée à ses deux extrémités **(Fig. 29 a : colonne libre chargée aux deux extrémités)**, la courbure occupe toute sa hauteur ; c'est le cas pour la courbure à concavité postérieure de la diaphyse fémorale **(Fig. 29, b : fémur de profil)**.

Si la colonne est fixée en bas et mobile en haut **(Fig. 30, a)**, il existe deux courbes opposées, la plus haute occupant les deux tiers de la colonne : ces incurvations correspondent à celles du fémur dans le plan frontal **(Fig. 30, b : fémur de face)**.

Si la colonne est fixée à ses deux extrémités **(Fig. 31, a)**, la courbe occupe ses deux quarts moyens, ce qui correspond aux courbures du tibia dans le plan frontal **(Fig. 31, b)**.

Dans le plan sagittal, le tibia présente trois caractéristiques **(Fig. 32 b)** :

- la **rétrotorsion** (**t**), déjettement postérieur déjà vu ;
- la **rétroversion** (**v**), pente de 5-6° inclinant les plateaux vers l'arrière. Il faut toujours la prendre en compte dans les arthroplasties totales du genou ;
- la **rétroflexion** (**f**), courbure à concavité postérieure d'une colonne mobile à ses deux extrémités **(Fig. 32, a)**, comme pour le fémur.

Les **courbures concaves opposées du fémur et du tibia** accroissent l'espace disponible entre les deux os dans la flexion extrême, ce qui permet de loger *un plus grand volume de masses musculaires* entre tibia et fémur **(Fig. 28 : squelette fémoro-tibial en flexion)**. C'est une *disposition équivalente à celle du coude* (voir Volume I) où le déjettement des extrémités articulaires offre un plus grand espace pour loger les masses musculaires lors de la flexion.

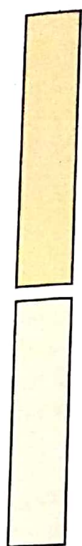


Fig. 22

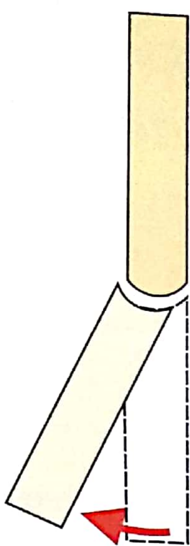


Fig. 23

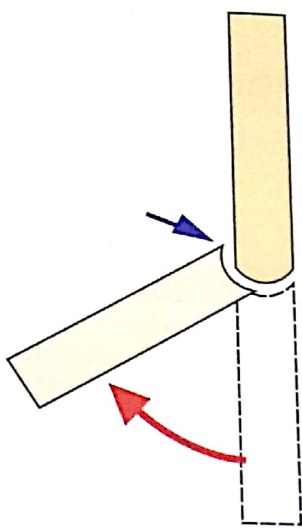


Fig. 24

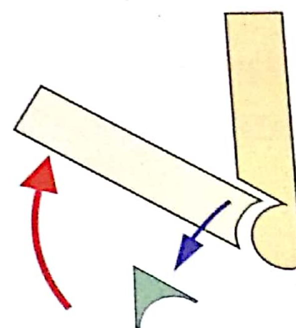


Fig. 25

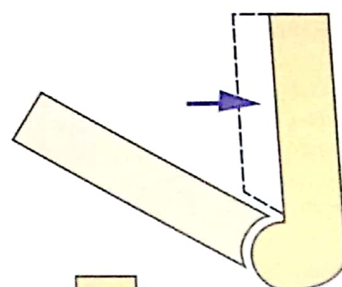


Fig. 26

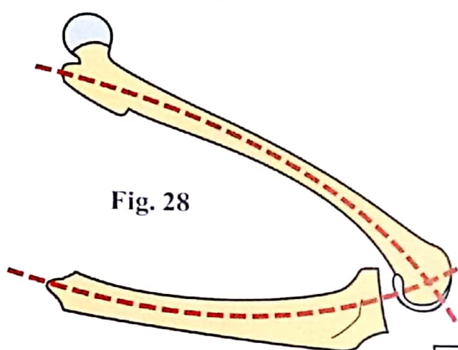


Fig. 28

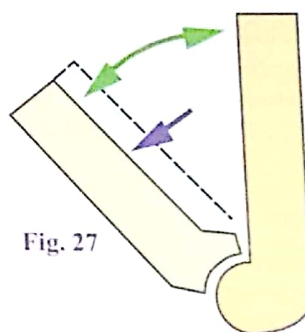


Fig. 27

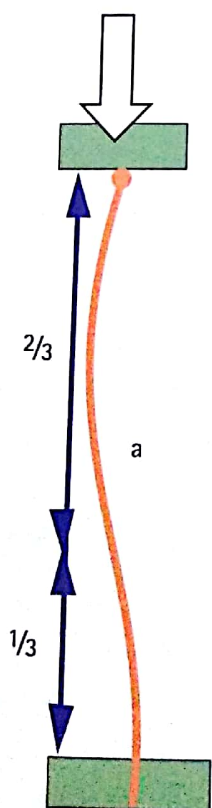
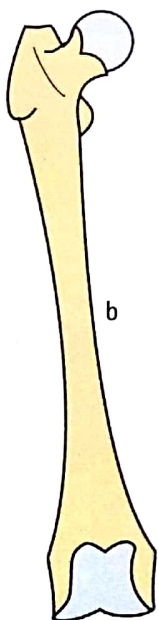


Fig. 30



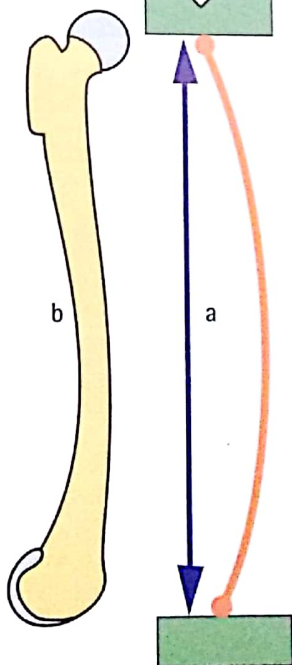


Fig. 29

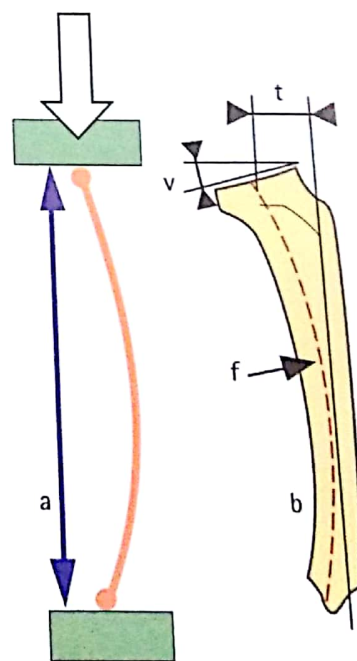
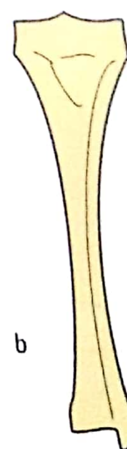


Fig. 32



1/4

1/2

a

1/4

Fig. 31

Architecture générale du membre inférieur et orientation des surfaces articulaires *(suite)*

Les torsions axiales des éléments du squelette du membre inférieur sont expliquées dans les figures de cette page par une sorte « d'algèbre anatomique ».

Les segments successifs du membre inférieur sont ici schématisés en vue supérieure.

La **torsion du fémur** est schématisée par ses deux extrémités **(Fig. 33)** :

- la partie supérieure ou cervico-céphalique **A**, comportant la tête et le col **(en bleu)** ;
- et avec l'épiphyse distale avec les deux condyles **B (en rouge)** ;
- sans torsion **b**, l'axe du col est parallèle à l'axe des condyles ;
- mais l'axe du col fémoral forme en réalité un angle de 30° avec le plan frontal **c** ;
- si bien que pour que l'axe des condyles reste frontal **d**, il faut introduire une torsion de la diaphyse fémorale de **– 30°** par rotation interne, ce qui correspond à l'angle d'antéversion du col fémoral.

La torsion au niveau du genou

Le genou met en contact **(Fig. 34 a)** les condyles fémoraux **B (en rouge)** et les plateaux **C (en vert)**. Il semble que les deux axes doivent être parallèles, contenus dans un plan frontal **b**. En réalité, la rotation axiale automatique **c** introduit une rotation interne du tibia sous le fémur de **+ 5°** en extension complète.

La torsion au niveau du tibia

Le squelette tibial **(Fig. 35)** est schématisé **a** par les plateaux tibiaux **C (en vert)** et par la mortaise tibio-fibulaire qui contient la poulie talaire **D (en marron)**. Les axes de ces deux surfaces articulaires ne sont pas parallèles **b**. Mais, du fait de la torsion du tibia **c**, ils forment un angle de + 25°, en rotation externe.

La résultante des torsions

Ces torsions échelonnées **(Fig. 36 : schémas en vue supérieure)** sur toute la longueur du membre inférieur **a** s'annulent : – 30° + 25° + 5° = 0°, si bien que le plan de flexion-extension de la tibio-tarsienne est à peu près dans la même direction que l'axe du col, c'est-à-dire *en rotation externe* de **+ 30°**, d'où déjettement de 30° en dehors de l'axe du pied, en station debout talons joints, bassin **(en rouge)** symétrique **b**.

Lors de la marche, l'avancée du membre oscillant *porte la hanche homologue vers l'avant* **c** ; si le bassin tourne de 30°, *l'axe du pied est alors dirigé directement vers l'avant*, dans le sens de la marche, ce qui permet un « déroulement du pas » optimum.

Fig. 33

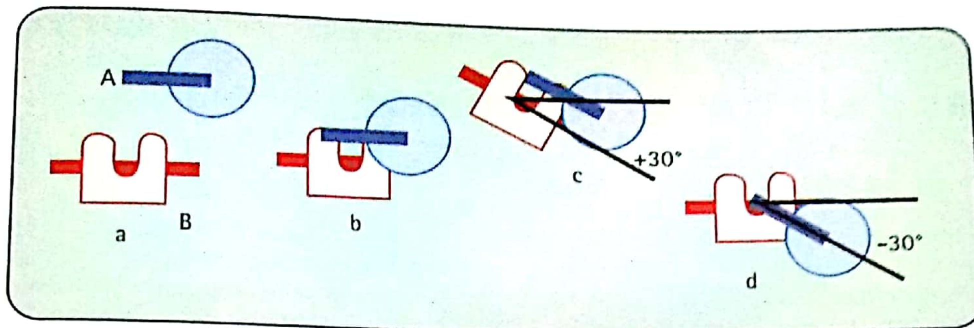
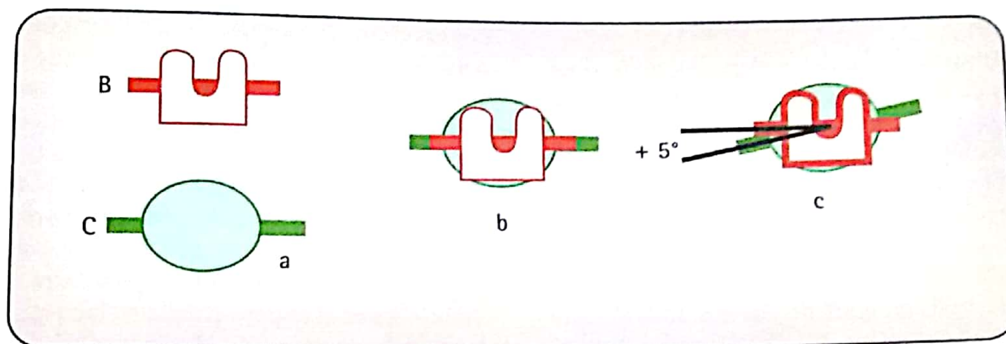


Fig. 34



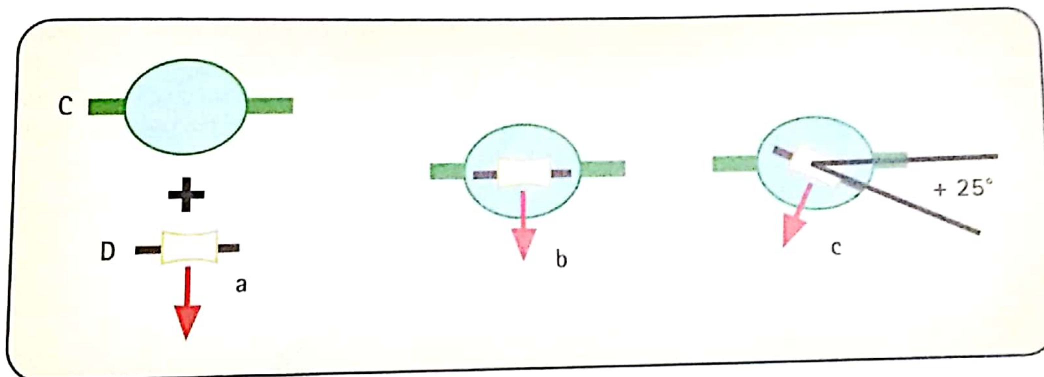
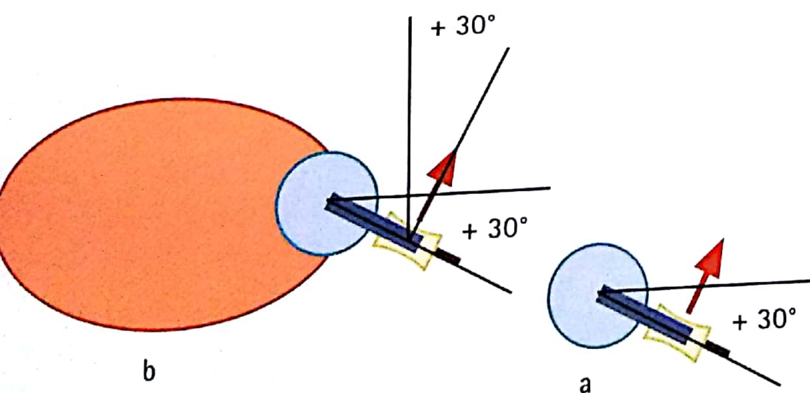


Fig. 35



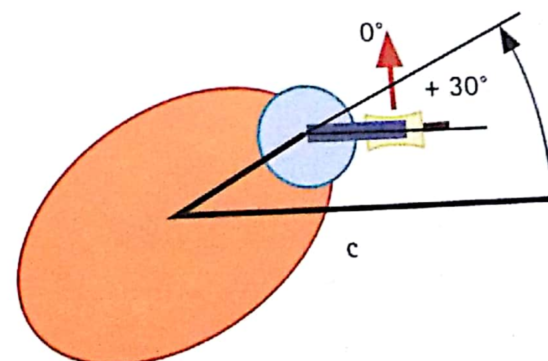


Fig. 36

Les surfaces de la flexion-extension

Le principal degré de liberté du genou, celui de la **flexion-extension**, qui correspond à l'*axe transversal*, est conditionné par une **articulation de type trochléaire**. En effet, les surfaces de l'extrémité inférieure du fémur constituent une poulie, ou plus exactement un segment de poulie **(Fig. 37)**, qui n'est pas sans rappeler par sa forme générale un train d'atterrissage jumelé d'avion **(Fig. 38)**.

Les **deux condyles fémoraux**, *convexes dans les deux sens*, forment les deux joues de la poulie et correspondent aux roues du train d'atterrissage ; ils se prolongent en avant **(Fig. 39)**, par les deux joues de la trochlée fémorale. Quant à la gorge de la poulie, elle est représentée en avant par la gorge de la trochlée fémorale et en arrière par la fossette intercondylaire, dont nous verrons la signification mécanique. Certains auteurs décrivent le genou comme une articulation bicondylaire ; ceci est vrai du point de vue anatomique, mais du point de vue mécanique, c'est indiscutablement une *articulation trochléaire d'un type spécial*, comme nous le verrons plus loin.

Du côté jambier, **les surfaces tibiales** sont inversement conformées et s'organisent sur deux gouttières parallèles, incurvées et concaves, séparées par une crête mousse antéro-postérieure **(Fig. 40 : vue perspective supéro-interne)**. La *glène externe* **GE** et la *glène interne* **GI** se disposent chacune dans une gouttière de la surface **S** et sont séparées par la crête mousse antéro-postérieure où se loge le *massif des épines tibiales* ; en avant, dans le prolongement de cette crête, se situe la *crête mousse de la face postérieure de la patella* **R** dont les deux versants prolongent, dans l'espace, la surface des glènes. Cet ensemble de surfaces possède un axe transversal **I**, qui coïncide avec l'axe des condyles **II** lorsque l'articulation est emboîtée.

Ainsi les glènes correspondent-elles aux condyles, tandis que le massif des épines tibiales vient se loger dans l'échancrure intercondylaire ; cet assemblage constitue fonctionnellement l'articulation fémoro-tibiale. En avant, les deux versants de la surface articulaire de la patella correspondent aux **deux joues de la trochlée fémorale**, tandis que la crête mousse verticale s'encastre dans la **gorge de la trochlée** ; ainsi se trouve constitué un deuxième ensemble fonctionnel, **l'articulation fémoro-patellaire**. Les deux articulations, fémoro-tibiale et fémoro-patellaire, bien qu'étant fonctionnellement distinctes, sont *contenues dans une seule et même articulation anatomique*, l'articulation du genou.

En première approximation et *envisagée seulement sous l'angle de la flexion-extension*, on peut se représenter l'articulation du genou comme une surface en forme de poulie glissant sur une double gouttière incurvée concave et jumelée **(Fig. 41)**. Mais, comme nous le verrons plus loin, la réalité est plus complexe.

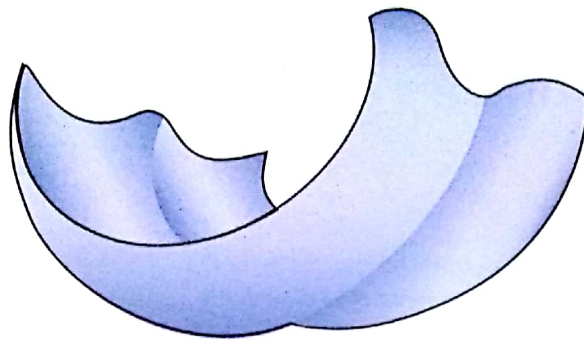


Fig. 37

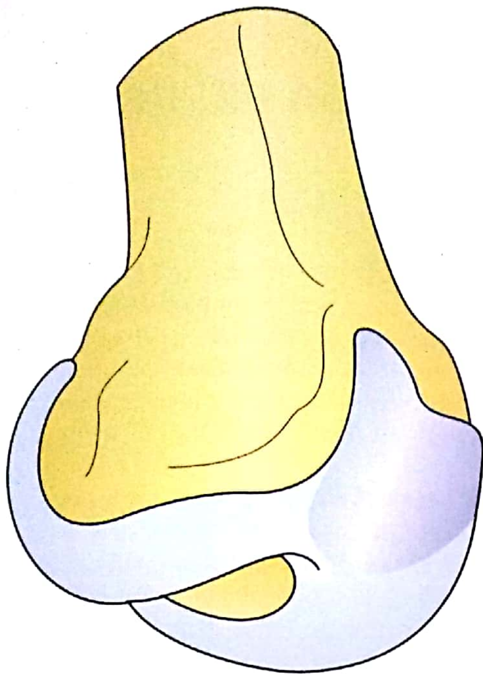


Fig. 39

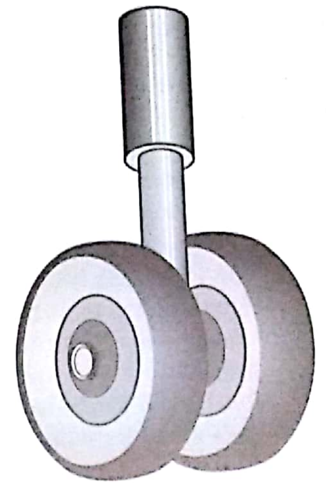


Fig. 38

S

R

GE

GI

Fig. 40

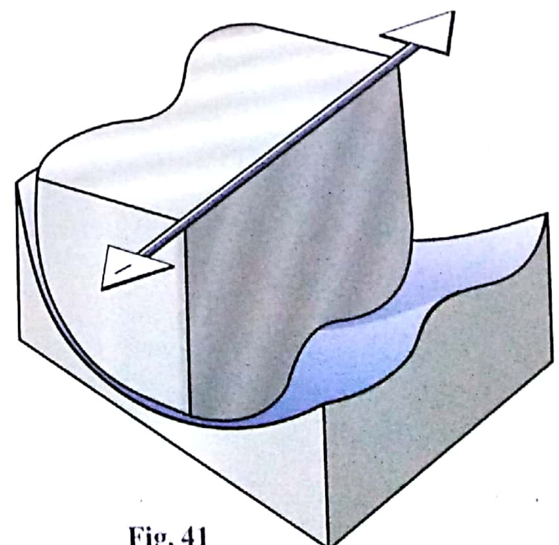


Fig. 41

Les surfaces tibiales en fonction de la rotation axiale

Telles qu'elles ont été décrites à la page précédente, les surfaces articulaires ne permettent qu'un seul mouvement : la flexion-extension. En effet, la crête mousse de la surface inférieure, en s'encastrant dans la gorge de la poulie sur toute sa longueur, empêche tout mouvement de rotation axiale de la surface inférieure sous la surface supérieure.

Pour que la rotation axiale devienne possible, il faut modifier la surface inférieure **(Fig. 42)** de telle sorte que la crête mousse perde de sa longueur et se transforme en pivot. Dans ce but, on découpe **(Fig. 43)** les deux extrémités de cette crête pour ne laisser persister que sa partie moyenne qui forme alors un **pivot**, encastré dans la gorge intercondylaire, autour duquel la surface inférieure peut tourner. Ce pivot, c'est le **massif des épines tibiales** qui forme le versant externe de la glène interne et le versant interne de la glène externe. Par ce pivot central, ou plus précisément par l'épine tibiale interne passe l'*axe vertical* R autour duquel s'effectuent les **mouvements de rotation longitudinale**. Certains auteurs désignent sous le nom de *pivot central* les deux ligaments croisés, considérés comme l'axe de rotation longitudinale du genou. Cette terminologie ne semble pas appropriée car le concept de pivot suppose un point d'appui solide, ce qui devrait le faire réserver à l'**épine tibiale interne**, véritable pivot mécanique du genou. En ce qui concerne le système des ligaments croisés, le terme de *liaison centrale* semble plus approprié.

Cette transformation des surfaces articulaires est plus facile à saisir lorsqu'on prend comme exemple un **modèle mécanique**. Prenons d'abord deux pièces **(Fig. 44)**, l'une supérieure comportant une rainure ; l'autre inférieure un tenon aux dimensions intérieures de la rainure, les deux pièces peuvent facilement *glisser l'une sur l'autre* **(flèches)** mais non tourner l'une par rapport à l'autre.

Si nous éliminons les deux extrémités du tenon sur la pièce inférieure pour ne laisser subsister que sa partie centrale, dont tous les diamètres n'excéderont pas la largeur de la rainure **(Fig. 45)**, nous avons ainsi remplacé le tenon par un téton cylindrique formant **pivot**, qui va pouvoir se loger dans la rainure de la pièce supérieure.

Maintenant **(Fig. 46)** les deux pièces peuvent effectuer l'une par rapport à l'autre deux types de mouvements :

- un mouvement de **glissement** du pivot central le long de la rainure **(flèches supérieures)**, qui correspond à la flexion-extension ;
- un mouvement de **rotation** du pivot à l'intérieur de la rainure **(flèches inférieures)**, quelle que soit d'ailleurs sa position dans la rainure. Ce mouvement correspond à la rotation autour de l'axe longitudinal de la jambe.

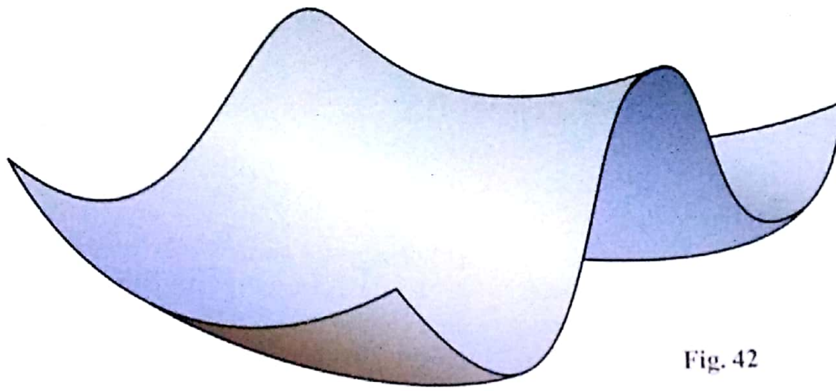


Fig. 42

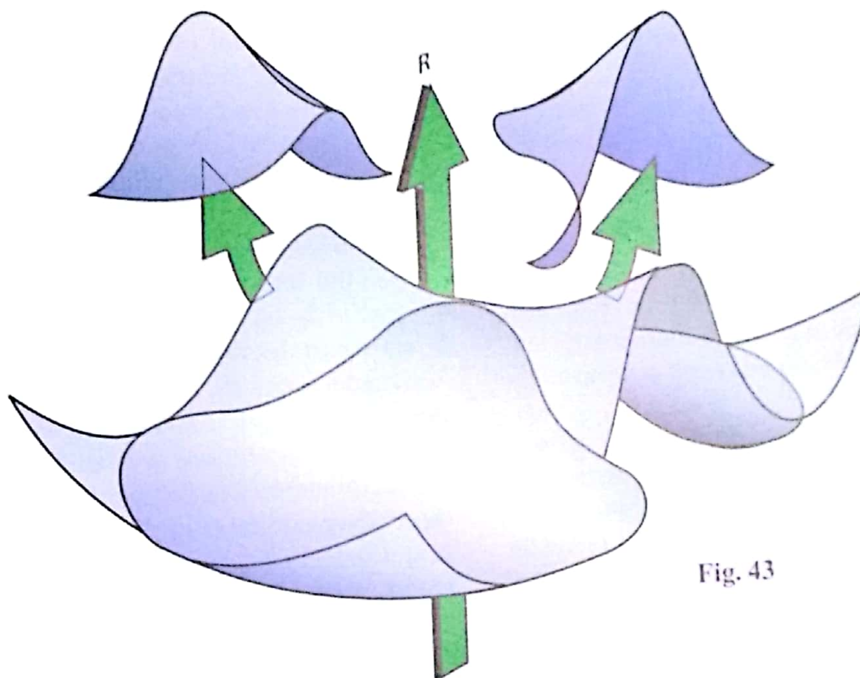


Fig. 43

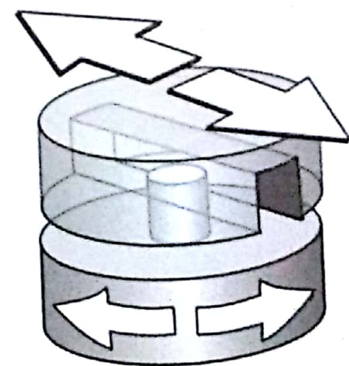


Fig. 46

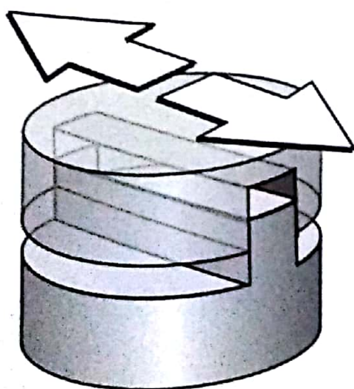


Fig. 44

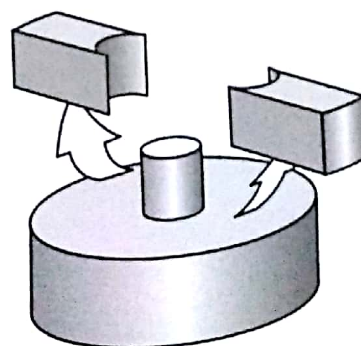


Fig. 45

Profil des condyles et des glènes

Vus par leur **face inférieure (Fig. 47)**, les condyles forment deux saillies convexes dans les deux sens et allongées d'avant en arrière. Les condyles ne sont pas strictement identiques : leurs grands axes antéro-postérieurs ne sont pas parallèles mais *divergents vers l'arrière* ; de plus, le condyle interne I diverge plus que l'externe E et il est aussi *plus étroit* que l'externe. Entre la trochlée et les condyles se dessine de chaque côté une légère crête, la *rainure condylo-trochléenne*, l'interne étant généralement plus accentuée que l'externe.

L'*échancrure intercondylienne* e est dans l'axe de la *fosse intercondylaire* f. La joue externe de la trochlée est plus saillante que l'interne.

Sur une **coupe frontale (Fig. 48)**, on note que la courbure convexe des condyles dans le sens transversal correspond à la courbure concave des glènes.

Pour étudier la *courbure des condyles et des glènes dans le plan sagittal*, il est commode d'effectuer une coupe vertico-sagittale suivant les directions **aa'** et **bb'** (**Fig. 48**) ; on obtient ainsi le profil exact des condyles et des glènes sur l'os frais (**Fig. 50 et 52 - 51 et 53**). Il apparait alors que le rayon de courbure des surfaces condylaires n'est pas uniforme, mais subit des variations comme dans une spirale.

En géométrie, la **spirale d'Archimède (Fig. 49)** est construite autour d'un point appelé centre C et chaque fois que le rayon R tourne d'un angle égal en R', il s'accroît d'une quantité égale.

La spirale des condyles est bien différente : certes, le rayon de courbure croît régulièrement d'arrière en avant, de 17 à 38 mm pour le condyle interne (**Fig. 50**) et de 12 à 60 mm pour le condyle externe (**Fig. 51**), mais il n'existe pas un centre unique à cette spirale, il existe *toute une série de centres disposés eux-mêmes sur une autre spirale* **mm'** (condyle interne) et **nn'** (condyle externe). La courbe des condyles est donc une **spirale de spirale**, comme l'a montré Fick, qui a nommé la spirale des centres de courbure, *la courbe évolute*.

D'autre part, à partir d'un certain point **t** du contour condylaire, le rayon de courbure commence à décroître ; ainsi, il passe de 38 à 15 mm vers l'avant du condyle interne (**Fig. 50**) et de 60 à 16 mm vers la surface tibiale.

Le **profil antéro-postérieur des glènes (Fig. 52 et 53)** est bien différent suivant la glène :

- la glène interne (**Fig. 52**) est **concave** vers le haut (le centre de courbure O est situé au-dessus) suivant un rayon de courbure de 80 mm ;
- la glène externe (**Fig. 53**) est **convexe** vers le haut (le centre de courbure O' est situé au-dessous) suivant un rayon de courbure de 70 mm.

Alors que la glène interne est concave dans les deux sens, la glène externe est concave transversalement et convexe sagittalement (sur l'os frais). Il en résulte que si le condyle fémoral interne est relativement stable dans sa glène, *le condyle externe est en position instable sur le dos d'âne de la glène externe*, sa stabilité lors du mouvement dépendant essentiellement de l'intégrité du ligament croisé antéro-externe LCAE.

D'autre part, les rayons de courbure des condyles et des glènes correspondantes ne sont pas égaux, il y a donc **discordance des surfaces articulaires** : l'articulation du genou est le type même des *articulations non concordantes*. Le rétablissement de la concordance est dévolu aux **ménisques** (voir p. 102). L'avant du condyle externe (**Fig. 51**) : là encore, les centres de courbure sont alignés sur une spirale **m'm''** (condyle interne) et **n'n''** (condyle externe). Au total, les lignes des centres de courbure forment deux spirales adossées dont le sommet très aigu **m'** et **n'** correspond sur le condyle au point de transition **t** entre deux segments du contour condylaire :

- en arrière du point **t**, la partie du condyle prenant part à l'*articulation fémoro-tibiale* ;
- en avant du point **t**, la partie du condyle et de la trochlée prenant part à l'*articulation fémoro-patellaire*.

Le point de transition **t** représente donc *le point le plus avancé* du contour condylaire pouvant entrer en contact direct avec la surface tibiale.

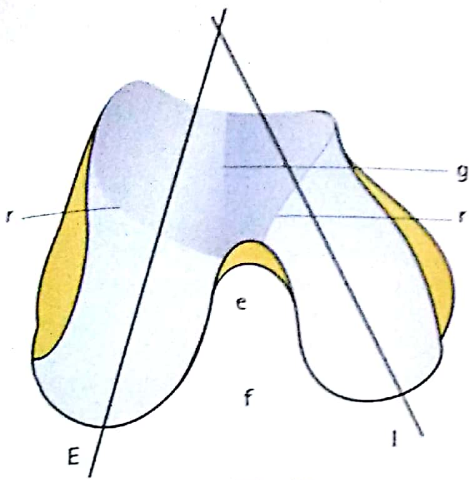


Fig. 47

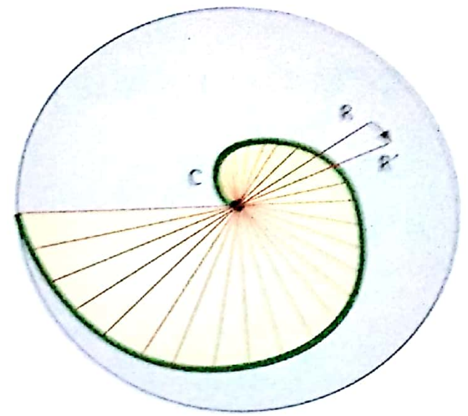


Fig. 49

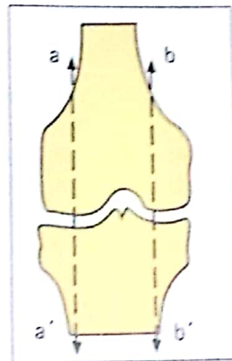


Fig. 48

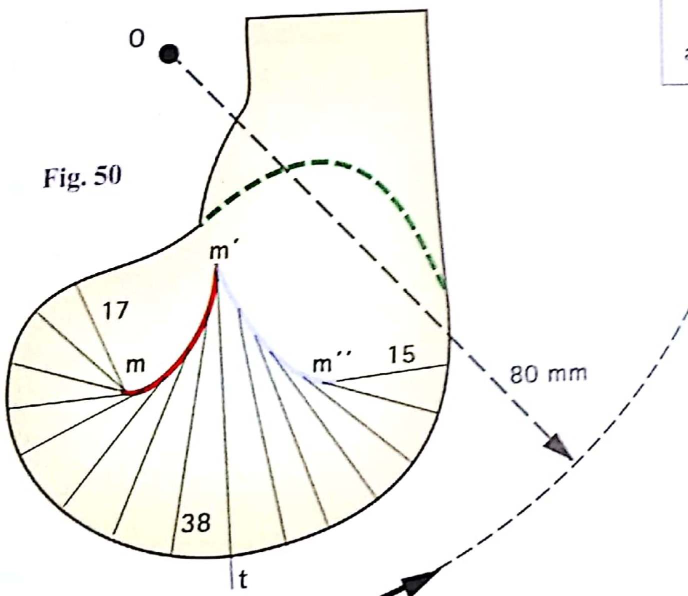


Fig. 50

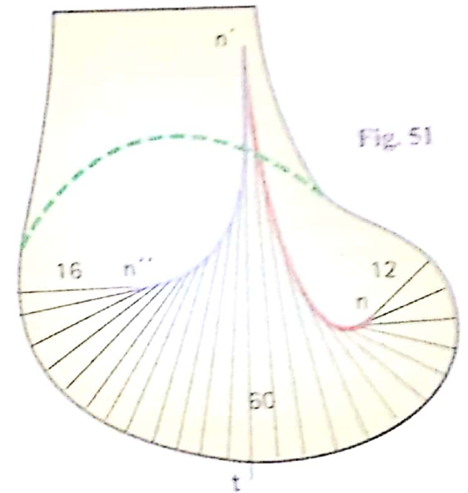


Fig. 51

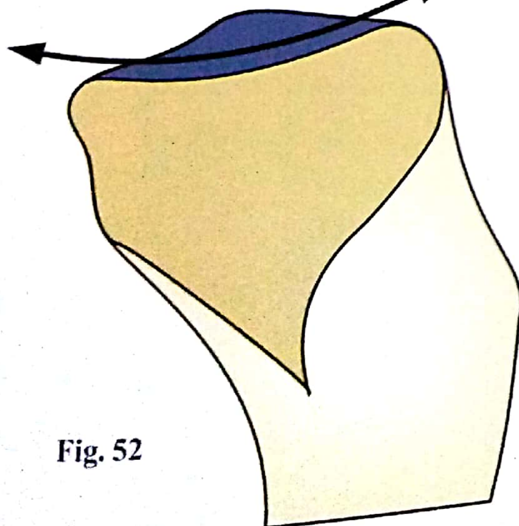


Fig. 52

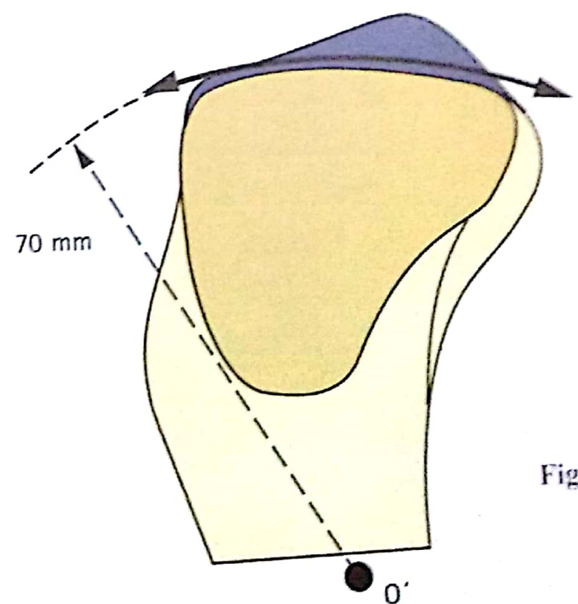


Fig. 53

Déterminisme du profil condylo-trochléaire

En 1967, j'ai démontré, en utilisant un **modèle mécanique (Fig. 54)**, que le contour de la trochlée et des condyles fémoraux sont déterminés comme des **lieux géométriques** dépendant d'une part des relations entre ligaments croisés et leurs bases d'insertion sur le fémur et le tibia, et d'autre part des relations entre le ligament patellaire, la patella et les rétinaculums patellaires (voir modèle II en fin de volume). **Lorsqu'on mobilise un tel modèle (Fig. 55)**, on voit se dessiner *le profil des condyles fémoraux et de la trochlée* comme étant la **courbe enveloppante** des positions successives des glènes tibiales et de la patella **(Fig. 56)**.

La **partie postérieure tibiale du contour condylo-trochléaire (Fig. 57)** est déterminée par les positions successives, notées de 1 à 5 (et toutes les intermédiaires) du plateau tibial, « asservi » au fémur par le ligament croisé antéro-externe (LCAE) **(rouge)** et le ligament croisé postéro-interne (LCPI) **(bleu)**, chacun décrivant un arc de cercle centré par son insertion fémorale de rayon égal à sa longueur ; on constate ainsi qu'en flexion extrême, l'ouverture antérieure de l'interligne fémoro-tibial rend compte de la « détente » du LCAE en fin de flexion, alors que le LCPI est sollicité en traction.

La **partie antérieure patellaire du contour condylo-trochléaire (Fig. 58)** est déterminée par les positions successives, notées de 1 à 5 (et toutes les intermédiaires) de la patella, reliée au fémur par les rétinaculums patellaires et au tibia par le ligament patellaire.

Entre la partie antérieure patellaire et la partie postérieure tibiale du profil condylo-trochléaire, il existe un **point de transition t (Fig. 50 et 51 p. 91)** représentant la frontière entre l'articulation fémoro-patellaire et l'articulation fémoro-tibiale.

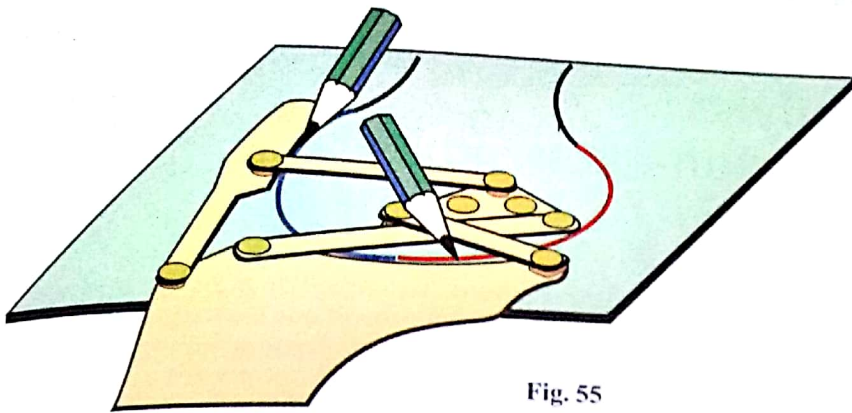
En modifiant les relations géométriques du système des ligaments croisés, il est possible de tracer une famille de courbes de condyles et de trochlée, ce qui rend compte de la « personnalité » de chaque genou. En effet, aucun ne ressemble à l'autre sur le plan strictement géométrique, d'où la *difficulté à établir des prothèses strictement adaptées à chacun* : elles ne peuvent être qu'une *approximation plus ou moins fidèle*.

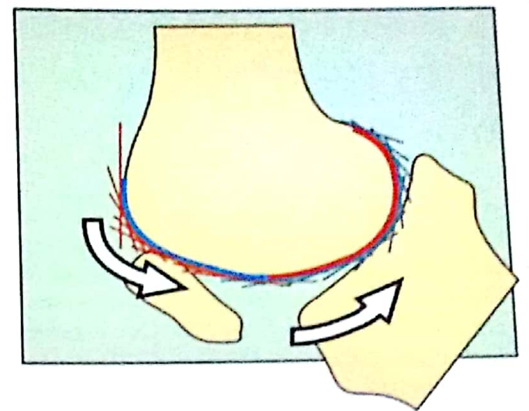
La même difficulté existe concernant les plasties ou les **prothèses ligamentaires** ; par exemple, si l'on déplace vers l'avant **(Fig. 59)** l'insertion tibiale du LCAE, le cercle décrit par son insertion fémorale va lui aussi se déplacer vers l'avant **(Fig. 60)**, ce qui va induire un nouveau profil condylaire, à l'intérieur du précédent, déterminant à son tour l'apparition d'un jeu mécanique facteur d'usure des surfaces cartilagineuses.

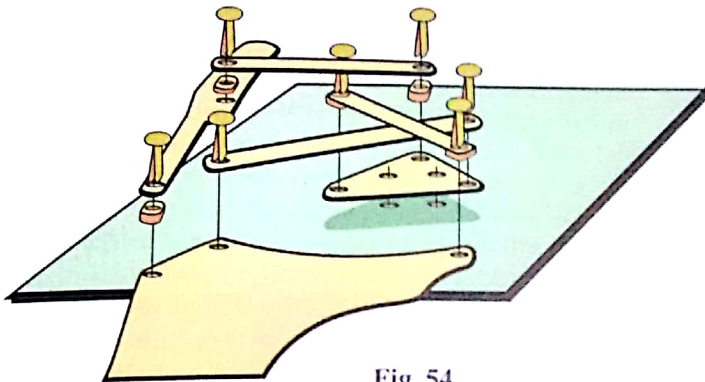
Ultérieurement en 1978, A. Menschik, de Vienne, a fait la même démonstration par des moyens purement géométriques.

Bien évidemment, toute cette théorie du déterminisme géométrique du profil condylo-trochléaire est basée sur l'**hypothèse de l'isométrie**, c'est-à-dire de *l'invariance de longueur des ligaments croisés*, dont on sait maintenant (*cf. infra*) qu'elle n'est pas confirmée par les faits. Il n'en reste pas moins qu'elle explique bien des constatations et peut servir de guide dans la conception des opérations sur les ligaments croisés.

Plus récemment, P. Frain et coll. en utilisant un modèle mathématique basé sur l'étude anatomique de vingt genoux, confirment la notion de *courbe-enveloppe* et de *polycentrisme des mouvements instantanés*, tout en insistant sur les interrelations fonctionnelles constantes des ligaments croisés et latéraux. Le tracé sur ordinateur des vecteurs vitesse en chaque point de contact fémoro-tibial reproduit exactement l'enveloppe du contour condylaire.


Fig. 55


Fig. 56


Fig. 54

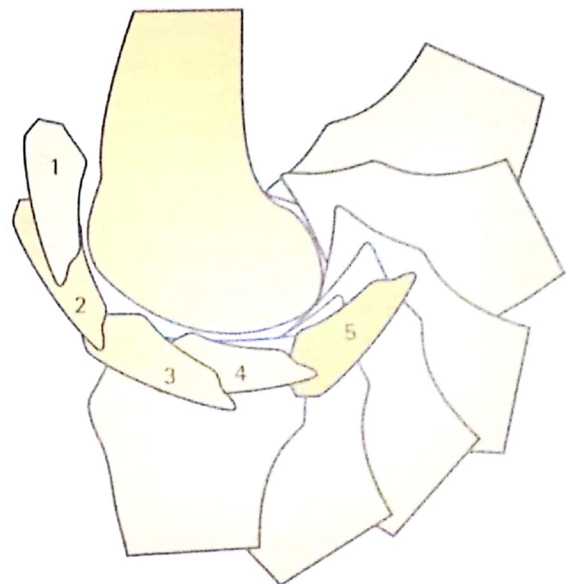


Fig. 58

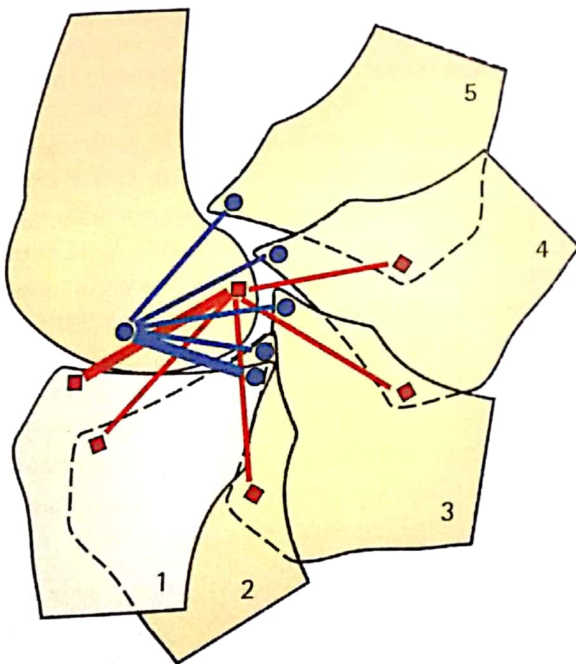
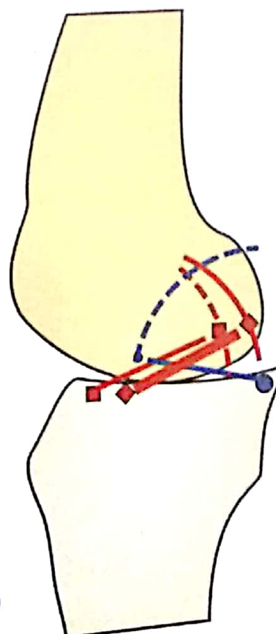
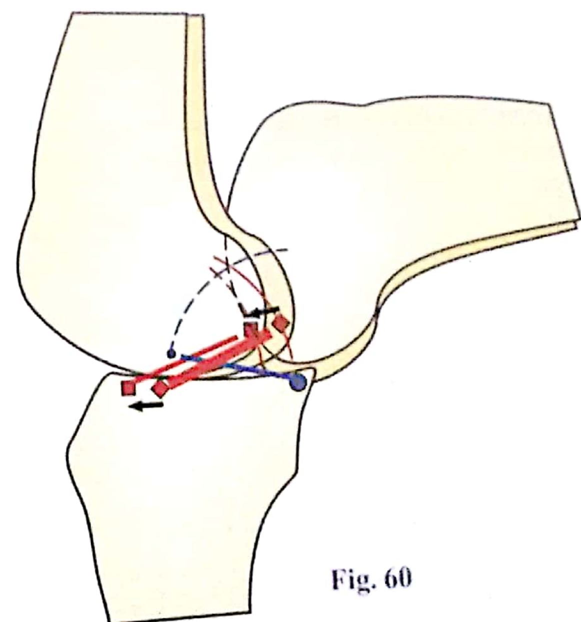


Fig. 57


Fig. 59


Fig. 60

Les mouvements des condyles sur les glènes lors de la flexion-extension

La forme arrondie des condyles pourrait laisser penser qu'ils roulent sur les surfaces tibiales ; il s'agit là d'une opinion erronée. En effet, *lorsqu'une roue roule sans glisser sur le sol* **(Fig. 61)**, à chaque point du sol correspond un seul point de la roue : la distance parcourue sur le sol **00"** est donc exactement égale à la portion de circonférence qui s'est *déroulée* sur le sol (comprise entre le repère triangulaire et le losange). S'il existait un **simple roulement du condyle (Fig. 62)**, à partir d'un certain degré de flexion **(position II)**, le condyle basculerait en arrière de la glène – il y aurait une luxation – ou bien il faudrait que le plateau tibial soit plus long vers l'arrière. *La possibilité d'un roulement pur est donc interdite* par le fait que le développement du condyle est *deux fois plus grand* que la longueur de la glène.

Supposons maintenant que **la roue glisse sans rouler (Fig. 63)** : à un seul point sur le sol correspondra toute une portion de circonférence sur la roue. C'est ce qui se produit lorsqu'une roue « patine » au démarrage sur le verglas. On pourrait concevoir un **tel glissement pur du condyle sur la glène (Fig. 64)** : à un seul point sur la glène correspondraient tous les points du contour condylaire ; mais on constate alors que la flexion serait prématurément limitée par sa butée sur le rebord postérieur de la glène **(flèche)**.

Il est possible aussi d'imaginer que **la roue roule et glisse à la fois (Fig. 65)** : elle patine mais avance quand même. À la distance parcourue au sol **00'** correspond alors une longueur plus grande sur la roue (entre le losange et le triangle bleus) qu'on peut apprécier en la déroulant sur le sol (entre losange bleu et triangle blanc).

L'expérience des frères Weber (Fig. 66) a montré en 1836 que les choses se passaient ainsi dans la réalité : pour plusieurs positions entre l'extension et la flexion extrêmes, ils ont marqué sur le cartilage les points de contact entre condyle et glène. Ils ont ainsi pu constater d'une part que le point de contact sur le tibia reculait avec la flexion **(triangle noir : extension-losange bleu flexion)** et d'autre part que la distance entre les points de contact marqués sur le condyle était deux fois plus grande que celle séparant les points de contact sur la glène. **Cette expérience prouve donc indiscutablement que le condyle roule et glisse à la fois sur la glène**. C'est d'ailleurs la seule façon d'éviter la luxation postérieure du condyle tout en permettant la plus grande flexion (160°, comparer la flexion dans les figures 64 et 66) (Ces expériences peuvent être reproduites avec le modèle III en fin de volume.)

Les *expériences de Strasser* (1917) ont montré que la proportion de roulement et de glissement n'était pas la même pendant tout le mouvement de flexion-extension : à partir de l'extension extrême, *le condyle commence par rouler sans glisser, puis le glissement devient progressivement prédominant sur le roulement*, si bien qu'en fin de flexion le condyle glisse sans rouler. Enfin, cette longueur de roulement pur du début de la flexion est différente suivant le condyle considéré :

- pour le condyle interne **(Fig. 67)**, ce roulement n'a lieu que pendant les 10 à 15 premiers degrés de flexion ;
- pour le condyle externe **(Fig. 68)**, ce roulement se poursuit jusqu'à 20° de flexion.

Le condyle externe roule donc beaucoup plus que l'interne, ce qui explique en partie que le chemin qu'il parcourt sur la glène soit plus long que celui que parcourt l'interne. Nous retrouverons cette notion importante pour *expliquer la rotation automatique* (voir p. 154).

Il est d'autre part intéressant de noter que ces 15 à 20° de roulement initial correspondent à l'*amplitude habituelle des mouvements de flexion-extension lors de la marche normale*.

P. Frain et coll. démontrent qu'en chaque point de la courbe condylaire on peut définir d'une part le centre du *cercle osculateur*, qui représente le centre de la courbure condylaire en ce point, et, d'autre part, le centre du mouvement, qui représente le point autour duquel le fémur tourne par rapport au tibia ; ce n'est que lorsque ces deux points sont confondus qu'il existe un roulement pur, sinon la proportion de glissement par rapport au roulement est d'autant plus importante que le centre instantané du mouvement est plus éloigné du centre de courbure.

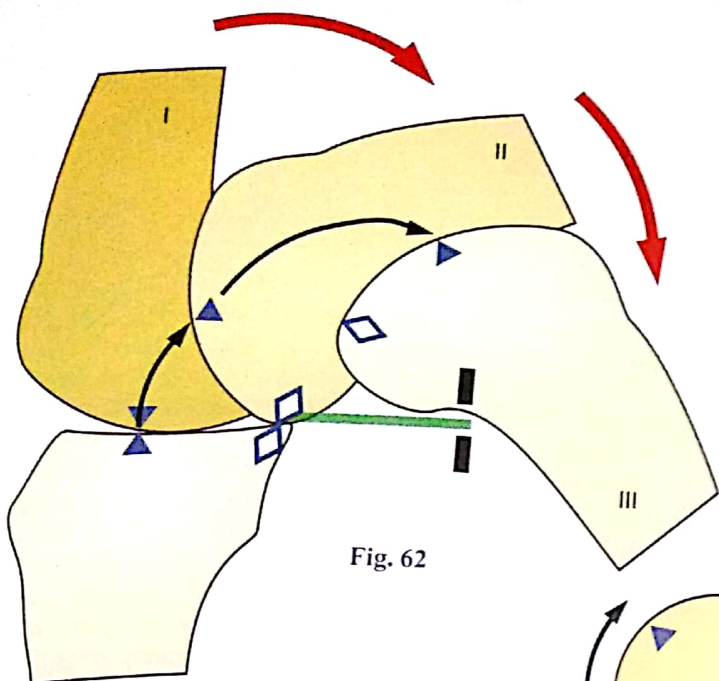


Fig. 62

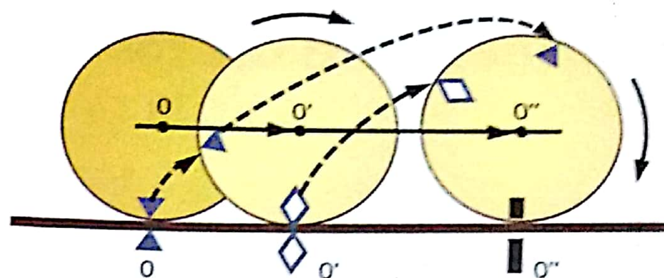


Fig. 61

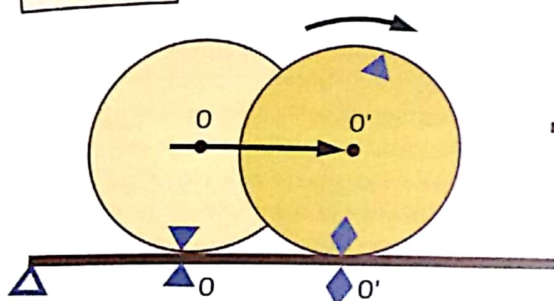
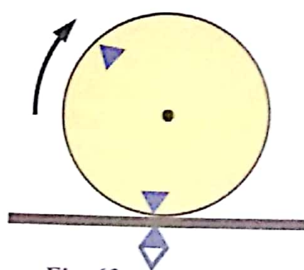
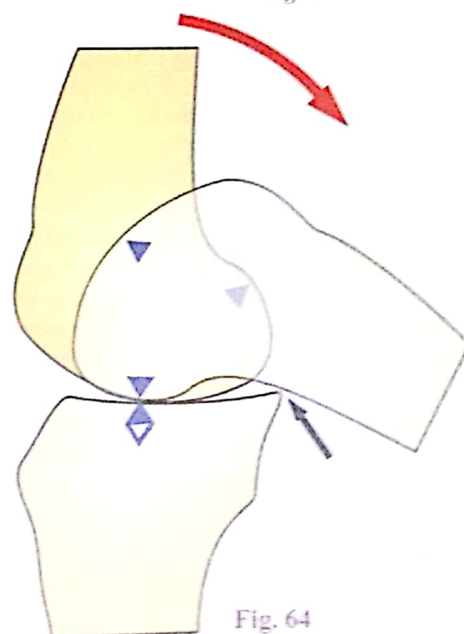


Fig. 65


Fig. 63


Fig. 64

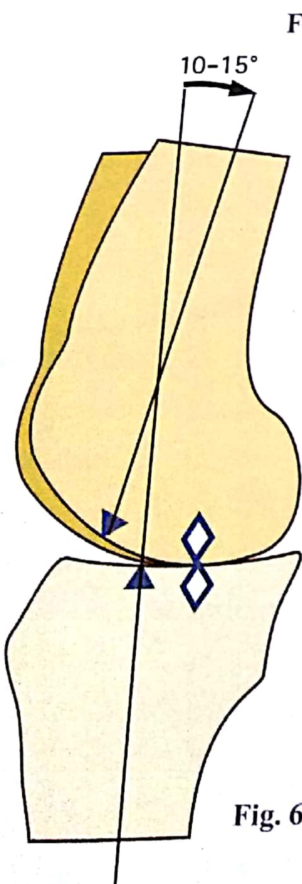


Fig. 67

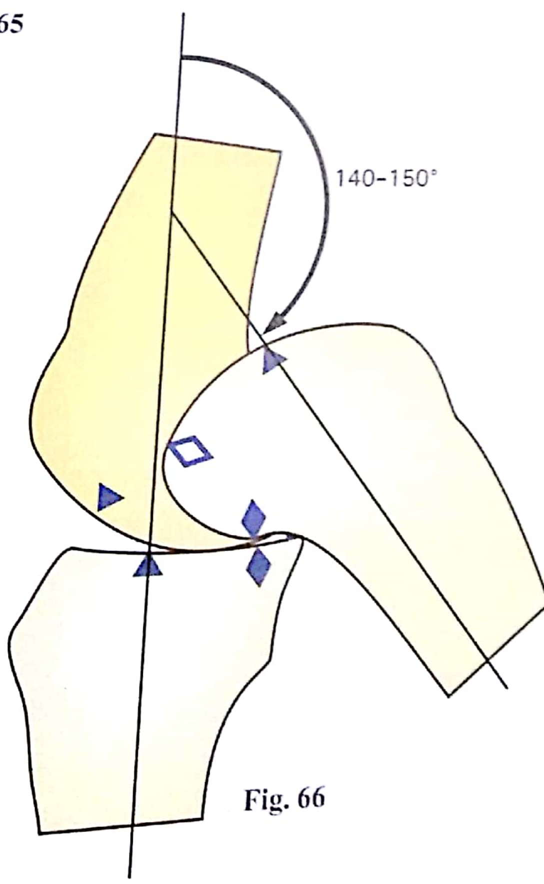


Fig. 66

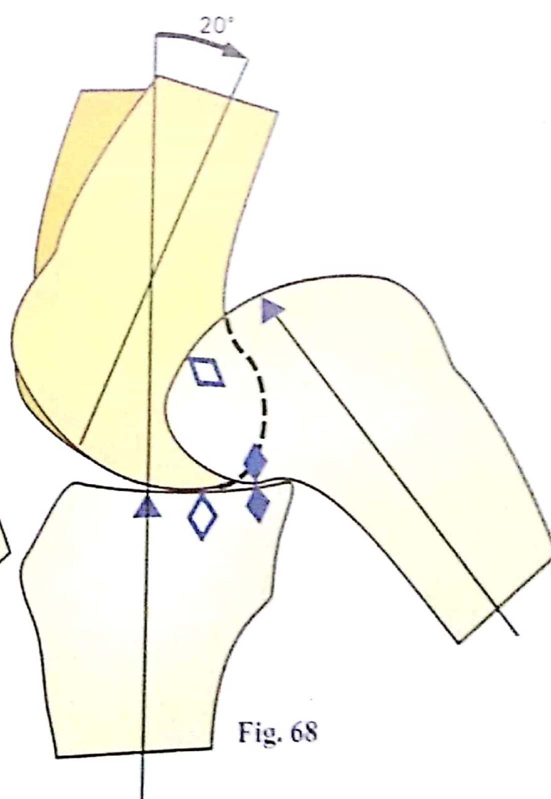


Fig. 68

Les mouvements des condyles sur les glènes lors de la rotation axiale

Nous verrons ultérieurement pourquoi le mouvement de rotation axiale ne peut s'effectuer que lorsque le genou est fléchi. En **position de rotation indifférente (Fig. 69)**, le genou étant demi-fléchi, la partie postérieure des condyles entre en contact avec la partie moyenne des glènes. Ce fait est mis en évidence par le diagramme **(Fig70 : vue supérieure superposée des condyles sur les glènes tibiales)** où la silhouette des condyles se superpose en transparence sur le contour plus foncé des glènes tibiales. On peut aussi noter sur ce schéma que la flexion du genou a dégagé le massif des épines tibiales du fond de l'échancrure intercondylaire où il se trouve encastré dans l'extension (c'est là une des causes du blocage de la rotation axiale en extension).

Lors de **la rotation externe du tibia sous le fémur (Fig. 71)**, le condyle externe avance dans la glène externe, tandis que le condyle interne recule dans la glène interne **(Fig. 72)**.

Lors de **la rotation interne du tibia sous le fémur (Fig. 73)**, le phénomène inverse se produit : le condyle externe recule dans sa glène tandis que l'interne avance dans la sienne **(Fig. 74)**.

En réalité, les mouvements antéro-postérieurs des condyles dans leur glène respective ne sont pas tout à fait semblables :

- **le condyle interne (Fig. 75)** se déplace relativement peu dans la concavité de la glène interne **1**, qui est concave dans les deux sens ;
- **le condyle externe (Fig. 76)** par contre possède une course **L** presque deux fois plus grande *sur la convexité de la glène externe*. Lors de son déplacement sur la glène d'avant en arrière, il « monte » d'abord sur le versant antérieur, jusqu'au sommet du « dos d'âne », puis redescend sur le versant postérieur ; ce faisant, il change « d'altitude » **e**.

La différence de forme entre les deux glènes se traduit par un changement de forme des épines tibiales **(Fig. 77)**. Lorsqu'on effectue une coupe horizontale **a** suivant **xx'** du massif des épines, on constate que la face externe de l'épine externe **e** est convexe d'avant en arrière (comme la glène externe), tandis que la face interne de la glène interne **i** est concave (comme la glène interne). Si l'on ajoute à cela, comme le montre une coupe frontale **b**, que l'épine interne est nettement plus haute que l'externe, on conçoit que l'épine interne forme une sorte de heurtoir sur lequel vient buter le condyle interne, tandis que le condyle externe contourne l'épine externe. Il s'ensuit que l'**axe réel de la rotation axiale yy'** passe non pas entre les deux épines tibiales mais bien au **niveau du versant articulaire de l'épine interne** qui constitue le **véritable pivot central**. Ce décentrage vers le dedans se traduit justement par une course plus grande du condyle externe comme nous l'avons vu précédemment.

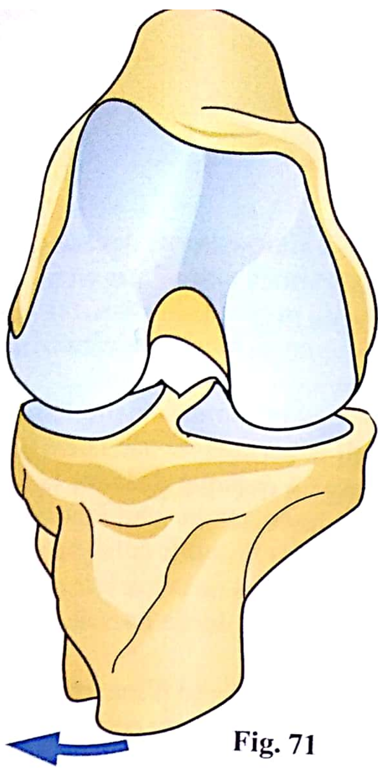
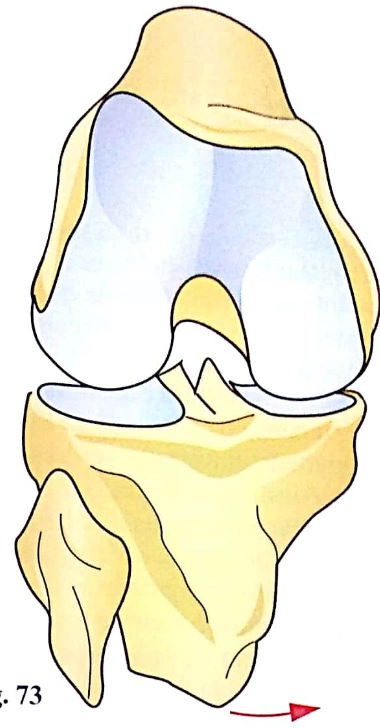
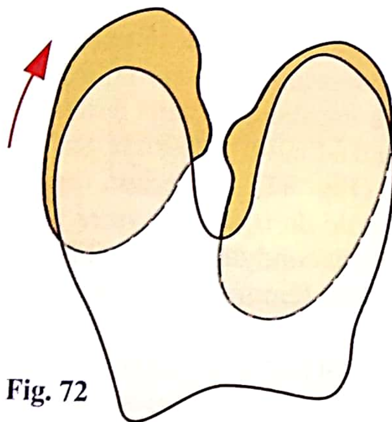
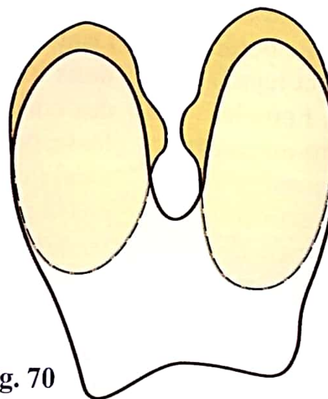
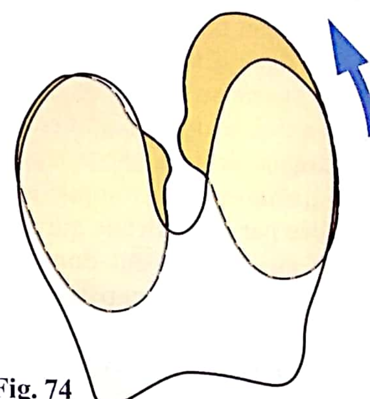

Fig. 71


Fig. 69


Fig. 73


Fig. 72


Fig. 70


Fig. 74

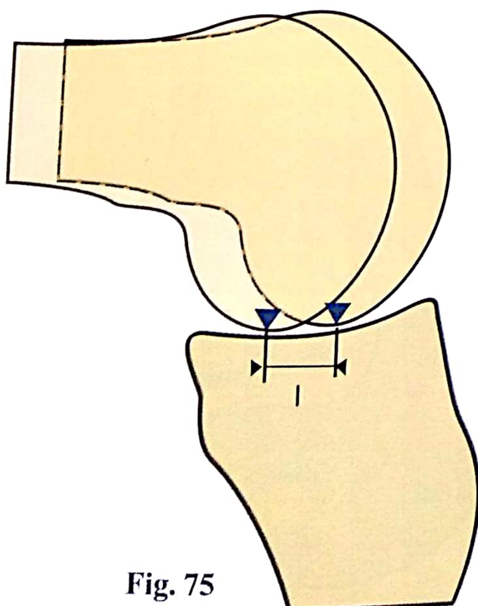


Fig. 75

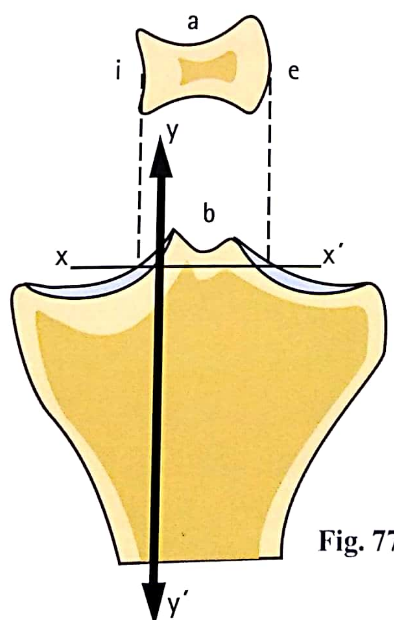


Fig. 77

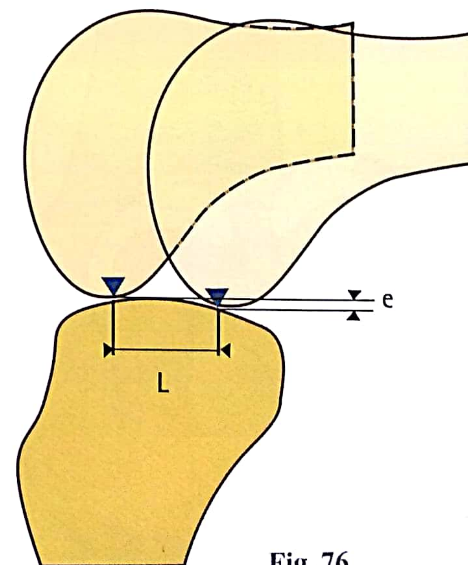


Fig. 76

La capsule articulaire

La capsule articulaire est un **manchon fibreux** qui enveloppe l'extrémité inférieure du fémur et l'extrémité supérieure du tibia, les maintient au contact l'une de l'autre et constitue les parois non osseuses de la cavité articulaire. Elle est doublée sur sa face profonde par la synoviale.

La **forme générale de la capsule du genou (Fig. 78)** peut être facilement comprise si on la compare à un cylindre dont on déprime la face postérieure suivant une génératrice (la flèche indique ce mouvement). Ainsi se trouve réalisée une cloison sagittale dont nous verrons les rapports étroits avec les ligaments croisés (voir p. 126) et qui partage *presque* la cavité articulaire en *deux moitiés externe et interne*. Sur la face antérieure de ce cylindre est découpée une *fenêtre* dans laquelle vient se « sertir » la **patella**. Les bords du cylindre s'insèrent sur le fémur en haut et sur le tibia en bas.

L'**insertion sur le plateau tibial** est relativement simple **(Fig. 79)** ; la ligne d'insertion **1 (verte et en tirets)** passe en avant et sur les côtés externe et interne des surfaces articulaires ; l'insertion rétroglénoïdale interne vient se confondre avec l'insertion tibiale du ligament croisé postéro-interne **PI** ; quant à la ligne d'insertion rétroglénoïdale externe, elle borde la glène externe au niveau de la surface rétrospinale et rejoint l'insertion tibiale du ligament croisé postéro-interne. Entre les deux ligaments croisés, le postéro-interne **PI** et l'antéro-externe **AE,** la capsule est interrompue et la *fente interligamentaire* **2** est comblée par la synoviale qui a recouvert les deux ligaments croisés. Ceux-ci peuvent donc être considérés comme des **épaississements de la capsule articulaire** dans l'échancrure intercondylaire.

L'**insertion fémorale de la capsule (Fig. 80 à 83)** est un peu plus complexe.

- **En avant (Fig. 80 : vue inféro-antéro-externe des condyles)**, elle contourne la fossette supratrochléaire **7** par en haut ; à cet endroit, la capsule forme un profond cul-de-sac **(Fig. 82 -83)**, le cul-de-sac subquadricipital **5**, dont nous verrons toute l'importance (voir p. 108).
- **Sur les côtés (Fig. 80-81)**, l'insertion capsulaire longe les joues de la trochlée, formant là les culs-de-sac latéro-patellaires (voir p. 108), puis longe à quelque distance la limite cartilagineuse des condyles, dessinant sur leur face cutanée les *rampes capsulaires de Chevrier* **8** ; sur le condyle externe, l'insertion capsulaire passe au-dessus de la *fossette où se fixe le tendon du poplité* **P** ; l'insertion de ce muscle est donc intracapsulaire **(Fig. 80)**.
- **En arrière et en haut (Fig. 81)**, la ligne d'insertion capsulaire contourne le bord postéro-supérieur du cartilage condylaire, juste au-dessous de l'insertion des muscles jumeaux **J** ; la capsule double ainsi la face profonde de ces muscles qu'elle sépare des condyles ; à ce niveau elle est épaissie et constitue les **coques condyliennes 6** (voir p. 120).
- Dans la fosse intercondylaire **(Fig. 82-83 : le fémur a été scié dans le plan sagittal)**, la capsule se fixe sur la face axiale des condyles au contact du cartilage, et dans le fond de la fosse, passant ainsi d'un bord à l'autre de la fosse. Sur la face axiale du condyle interne **(Fig. 82)**, l'insertion capsulaire *passe par l'insertion fémorale du ligament croisé postéro-interne* **4**. Sur la face axiale du condyle externe **(Fig. 83)**, la capsule se fixe avec l'insertion fémorale du ligament croisé antéro-externe **3**.

Là encore, l'insertion des croisés est pratiquement confondue avec celle de la capsule, dont ils constituent des renforcements.

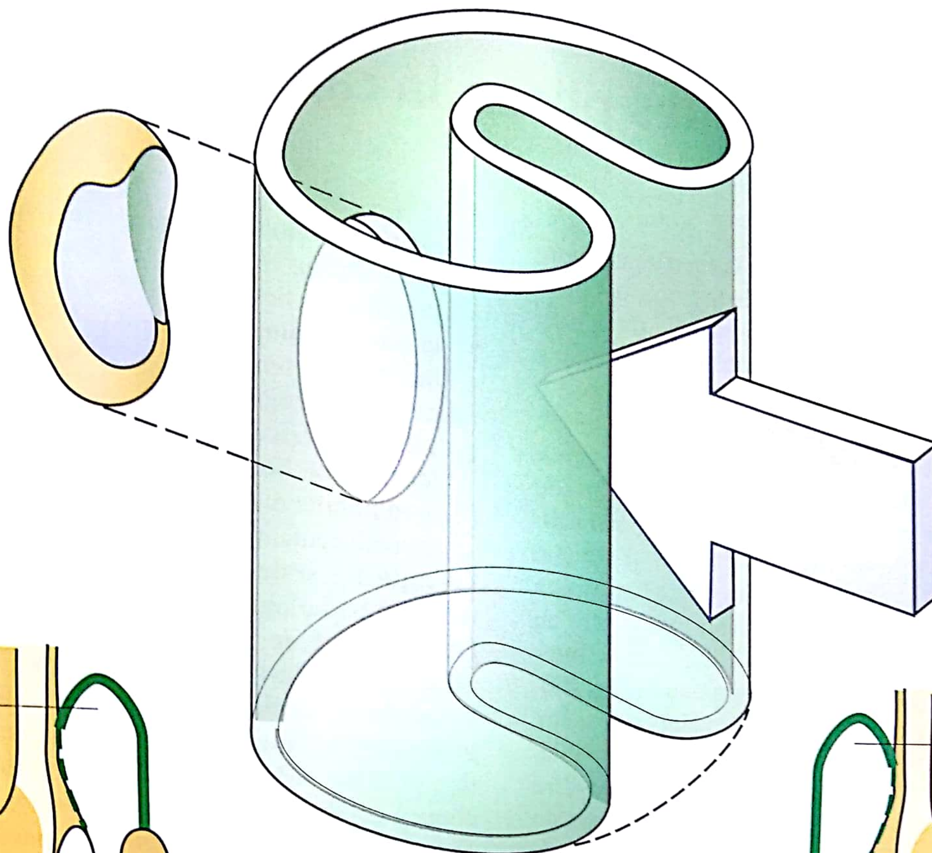


Fig. 78

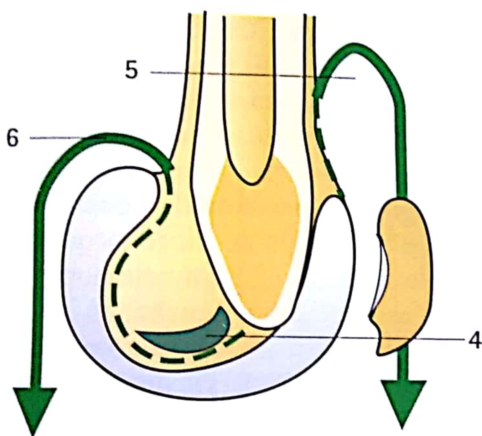


Fig. 82

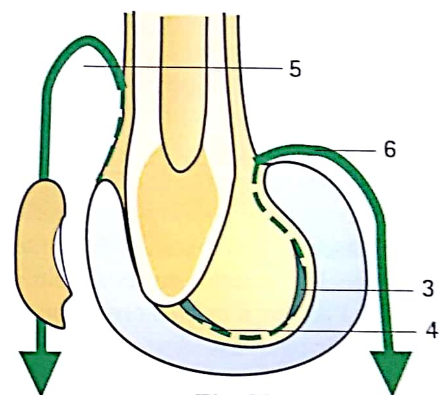


Fig. 83

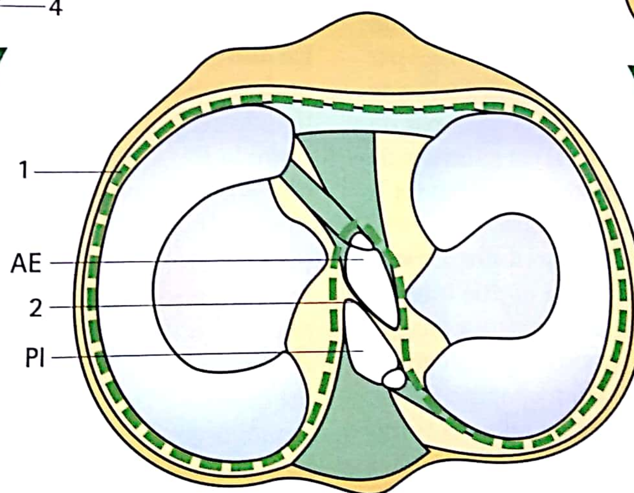


Fig. 79

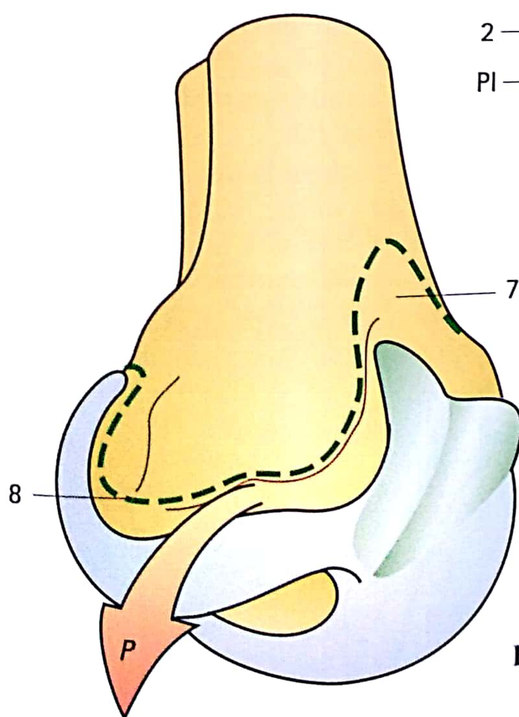


Fig. 80

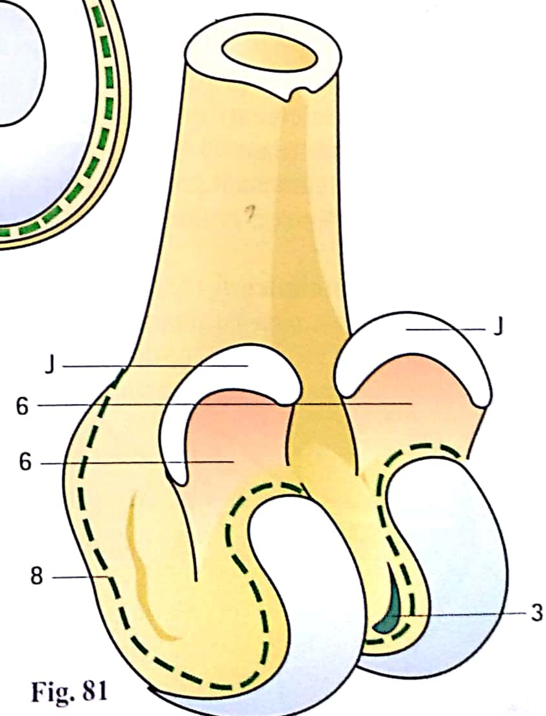


Fig. 81

Le ligament adipeux, les plicas, la capacité articulaire

Entre la surface préspinale du plateau tibial, la face postérieure du ligament patellaire et la partie inférieure de la trochlée fémorale existe un *espace mort* **(Fig. 84 : vue postéro-interne du genou après ablation de la moitié interne du fémur)**, comblé par le **paquet adipeux 1** du genou, équivalent d'une volumineuse frange graisseuse. Cette formation graisseuse a la forme d'une pyramide quadrangulaire dont la base repose sur la face postérieure **2** du **ligament patellaire 3** et déborde sur la partie antérieure de la surface préspinale. Sur une **vue antérieure du genou ouvert (Fig. 85)**, après bascule de la patella, on distingue le ligament adipeux par sa face supérieure **4**, rattachée par un cordon cellulo-graisseux tendu de la pointe de la patella jusqu'au fond de la fosse intercondylaire **(Fig. 84 et 85)** : c'est le **ligament adipeux 5**. Sur les côtés du ligament adipeux **(Fig. 85)**, les **replis alaires 6** se prolongent par des bourrelets graisseux jusque sur les bords latéraux de la moitié inférieure de la patella.
Le paquet adipeux joue le rôle de « *bouche-trou* », c'est-à-dire de remplissage à la partie antérieure de l'articulation ; lors de la flexion, il est comprimé par le ligament patellaire et *déborde de chaque côté de la pointe de la patella*.

Le ligament adipeux est le *vestige du septum médian* qui, chez l'embryon, sépare l'articulation en deux moitiés jusqu'à l'âge de quatre mois. Chez l'adulte, il existe normalement **(Fig. 84)** un *hiatus*, un espace, entre le ligament adipeux et la cloison médiane formée par les ligaments croisés **(flèche I)**. Les moitiés externe et interne de l'articulation communiquent donc par cet orifice et aussi par un *espace libre situé au-dessus du ligament* **(flèche II)** et en arrière de la patella. Quelquefois le septum médian persiste chez l'adulte et la communication ne se fait qu'au-dessus du ligament adipeux.

On appelle aussi cette formation la **plica infrapatellaire**. Le **système des plicas** est composé **(Fig. 89 : vue de la moitié interne du genou fendu sagittalement)** de *trois replis synoviaux* inconstants mais très fréquents (dans 85 % des genoux selon Dupont). Ils sont bien connus maintenant grâce à l'arthroscopie :

- **la plica infrapatellaire 5** prolonge le paquet adipeux infrapatellaire (65,5 %) ;
- **la plica suprapatellaire 6** (55,5 % des cas) forme une cloison transversale plus ou moins complète au-dessus de la patella, pouvant séparer le cul-de-sac subquadricipital de la cavité articulaire ; elle ne joue un rôle pathologique que quand elle cloisonne complètement le cul-de-sac, pouvant alors réaliser le tableau d'une « hydarthrose suspendue » : tuméfaction liquidienne fixée au dessus de la patella ;
- **la plica médiopatellaire** 7 (24 %) peut former une cloison incomplète, tendue horizontalement du bord interne de la patella au fémur, à la manière d'une « *étagère* » (*shelf* des auteurs américains). Elle peut être responsable de douleurs lorsque son bord libre vient irriter, par son frottement, le bord interne du condyle interne. Les troubles disparaissent immédiatement par résection sous arthroscopie.

La **capacité articulaire** subit d'importantes variations normales et pathologiques. Un épanchement pathologique peut être constitué de liquide synovial : c'est une **hydarthrose** ou de sang : c'est une **hémarthrose**. Cet épanchement peut l'augmenter considérablement **(Fig. 86)** à condition qu'il soit *progressif* ; le liquide s'accumule dans les culs-de-sac subquadricipital **Sq** et latéro-patellaires, et aussi en arrière sous les coques condylaires dans les culs-de-sac rétrocondylaires Rc. *Suivant la position du genou*, la répartition du liquide est différente **en extension (Fig. 87)**, les culs-de-sac rétrocondylaires sont comprimés par la mise en tension des muscles jumeaux et le liquide est chassé vers l'avant **(flèche blanche)** où il s'accumule dans les culs-de-sac subquadricipital et latéro-patellaires. **En flexion (Fig. 88)**, ce sont les culs-de-sac antérieurs qui se trouvent comprimés par la mise en tension du quadriceps et le liquide est chassé vers l'arrière **(flèche blanche)**.
Entre la flexion et l'extension extrêmes, il existe une **position dite « de capacité maximum » (Fig. 86)** pour laquelle la pression du liquide intra-articulaire est *la moins forte* : c'est cette position de demi-flexion qu'adoptent tout naturellement les malades porteurs d'un épanchement articulaire, car elle est *la moins douloureuse*.

À l'état normal, la quantité de liquide synovial – ou **synovie** – est très faible (quelques centimètres cubes). Cependant, les mouvements de flexion-extension assurent le *balayage permanent des surfaces* articulaires par la synovie, ce qui concourt à la *bonne nutrition* du cartilage et surtout à la *lubrification* des zones de contact.

Sur ce schéma, noter le muscle quadriceps **Q**, et le muscle articulaire du genou **SQ** qui tend le cul-de-sac subquadricipital.

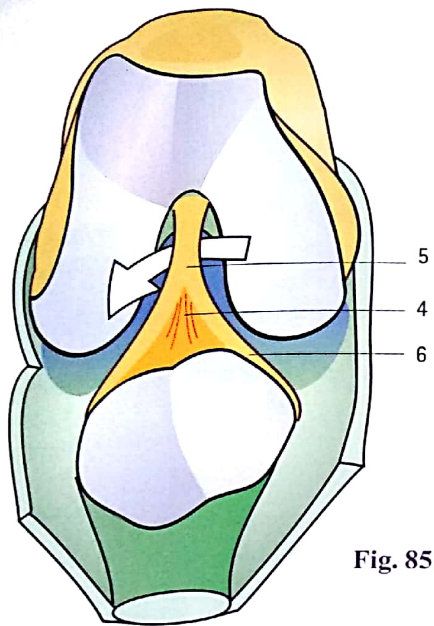


Fig. 85

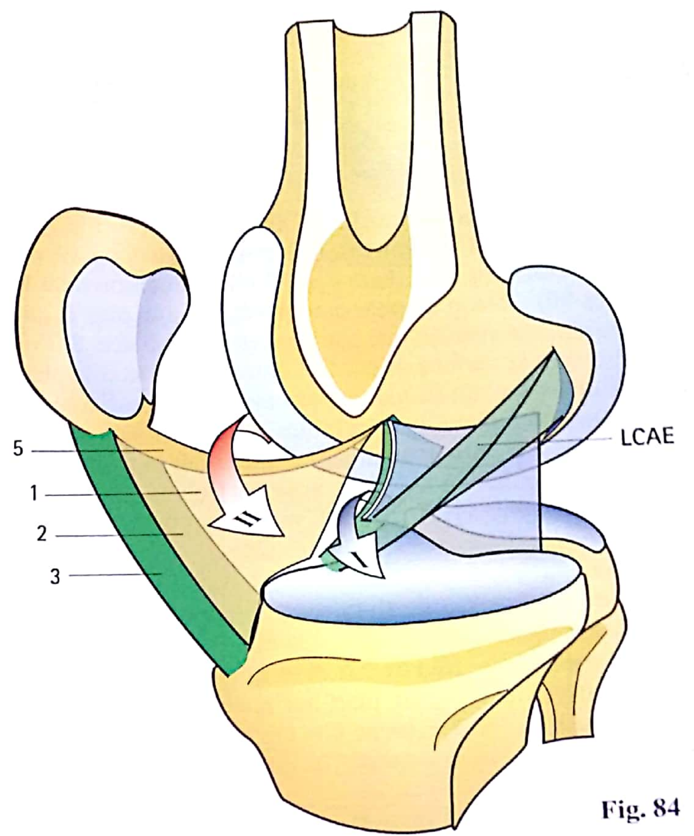


Fig. 84

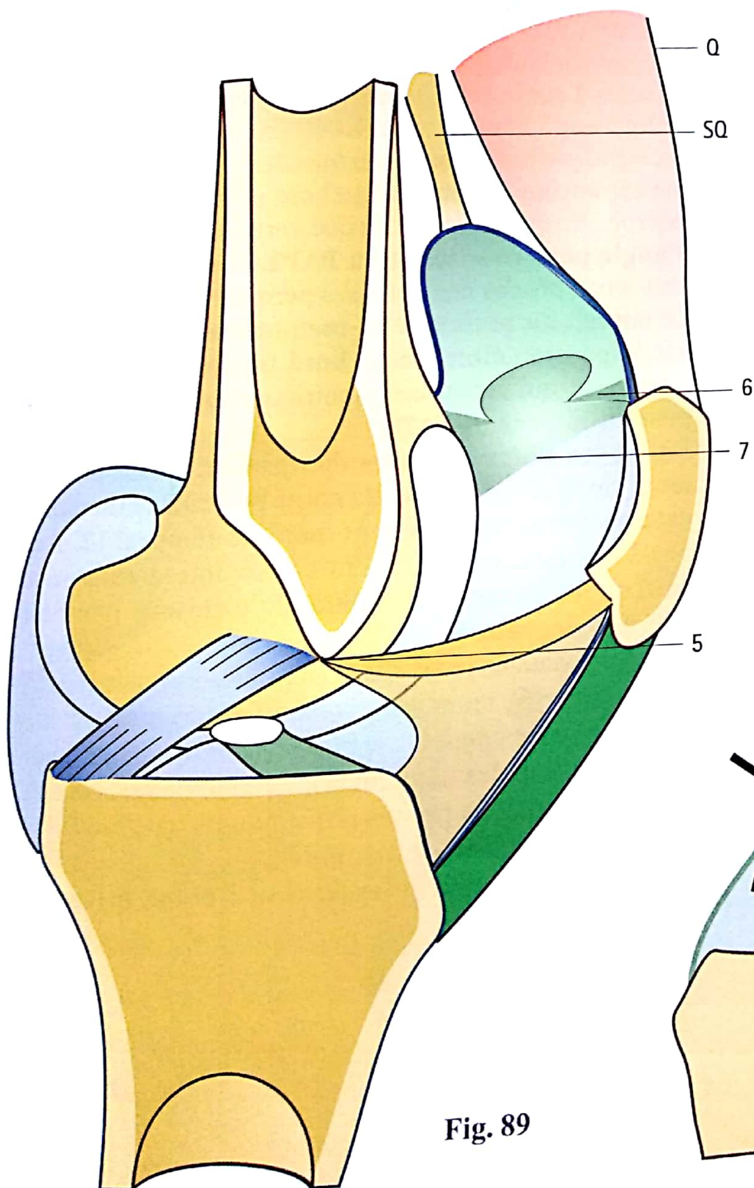


Fig. 89

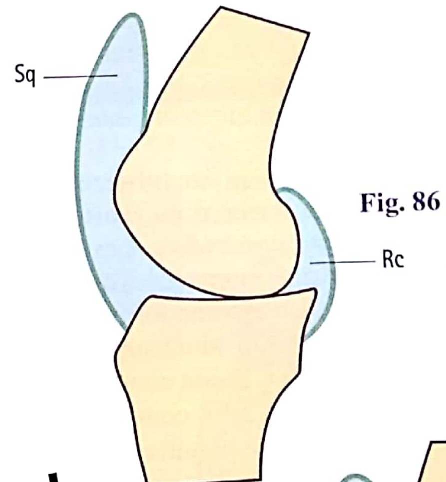


Fig. 86

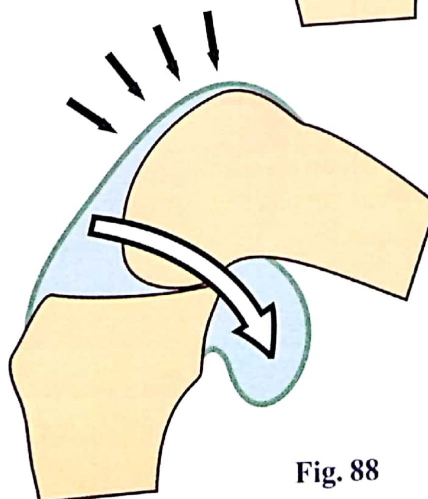


Fig. 88

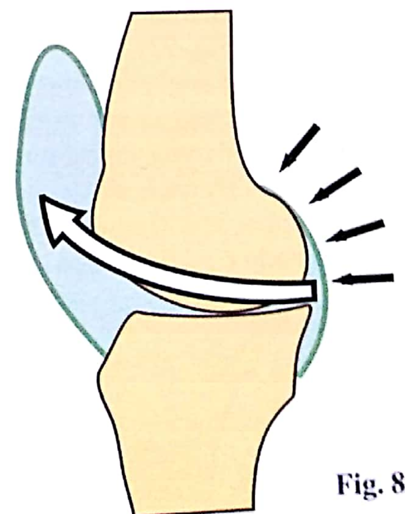


Fig. 87

Les ménisques interarticulaires

La non-concordance des surfaces articulaires (voir p. 90) est compensée par l'interposition des **ménisques** ou **fibro-cartilages semi-lunaires**, dont il est facile de comprendre la forme **(Fig. 90)** : lorsqu'on pose une sphère **S** sur un plan **P**, elle n'entre en contact avec lui que par le point de tangence. Si l'on veut augmenter la surface de contact entre la sphère et le plan, il suffit d'interposer un *anneau* représentant le volume compris entre le plan, la sphère et le cylindre **C** tangent à la sphère. Un tel anneau **3 (couleur orangée)** a tout à fait la forme d'un ménisque, triangulaire à la coupe, avec ses trois faces :

- la *surface intérieure ou axiale* **1**, au contact de la sphère ;
- la *surface périphérique* **2**, cylindrique ;
- la *surface inférieure* **4**, plane.

Sur une **vue « éclatée » de l'appareil ménisco-ligamentaire (Fig. 91)**, les ménisques ont été « soulevés » au-dessus des glènes. Le **ménisque interne Mi** et le **ménisque externe Me** sont contenus dans le même plan horizontal, au dessus de la **glène interne Gi** et de l'**externe Ge**. On distinge :

- leur *face supérieure* **1**, concave, en contact avec les condyles, non figurés ici ;
- leur *face périphérique* **2**, cylindrique, sur laquelle se fixe à la face profonde de la capsule **(matérialisée par la couleur bleue en arrière-plan)** ;
- la *face inférieure,* non visible, à peu près plane, reposant sur la périphérie des deux glènes séparées par le massif des tubercules intercondylaires **3** : le tubercule interne est ici bien visible.

Ces anneaux sont interrompus au niveau des **tubercules intercondylaires**, si bien qu'ils ont la forme d'un **croissant** avec une *corne antérieure* et une *corne postérieure*. Les cornes du ménisque externe étant beaucoup plus rapprochées que celles de l'interne, il s'ensuit que le ménisque externe forme un anneau presque complet – il a la forme d'un **O** – alors que l'interne est en demi-lune – il a la forme d'un **C**. Chacun connaît le moyen mnémotechnique **OE-IC** (« ohé, hissez ! » comme le disaient les matelots de la marine à voiles !) pour se souvenir de la forme des ménisques **(Fig. 92)**.

Les ménisques ne sont pas libres entre les deux surfaces articulaires : ils contractent au contraire **des connexions très importantes du point de vue fonctionnel**.

- Sur **la coupe frontale du genou (Fig. 93)**, où les ménisques, vus en coupe, sont figurés en rouge, nous voyons l'insertion de la capsule **c** sur leur face périphérique.
- Sur le plateau tibial **(Fig. 91)**, au niveau de la *surface prés-pinale* se fixent les cornes antérieures des ménisques et sur la surface rétrospinale les cornes postérieures :

– la corne antérieure du ménisque externe **4** juste en avant du tubercule externe ;
– la corne postérieure du ménisque externe **5** juste en arrière du tubercule externe ;
– la corne postérieure du ménisque interne **7** dans l'angle postéro-interne de la surface rétrospinale ;
– la corne antérieure du ménisque interne **6** dans l'angle antéro-interne de la surface pré-spinale ;
– les deux cornes antérieures sont réunies par le **ligament jugal 8** ou transverse, qui est rattaché lui-même à la patella par des tractus du paquet adipeux.

- Des fibres s'étendent de chaque bord de la patella **R** vers les faces latérales des ménisques, constituant les rétinaculums patellaires **9**.
- Le ligament latéral interne **LLI** fixe ses fibres les plus postérieures **2** sur le bord interne du ménisque interne.
- Le ligament latéral externe **LLE**, par contre, est *séparé de son ménisque* par le tendon du muscle poplité **Pop**, qui envoie une **expansion fibreuse 10** au bord postérieur du ménisque externe ; ce qui constitue ce que certains appellent le **point d'angle postéro-externe** ou **PAPE** et que nous décrirons plus loin à propos des défenses périphériques du genou.
- Le **tendon du muscle semi-membraneux 11** envoie aussi une expansion fibreuse au bord postérieur du ménisque interne, ce qui constitue symétriquement le **point d'angle postéro-interne** ou **PAPI**.
- Enfin, des fibres distinctes du ligament croisé postéro-interne viennent se fixer sur la corne postérieure du ménisque externe, formant le **ligament ménisco-fémoral 12**. Il existe aussi des fibres du ligament croisé antéro-externe allant se fixer sur la corne antérieure du ménisque interne **(voir Fig. 166, légende 5, p 119)**.

Les coupes frontales **(Fig. 93)** et sagittales internes **(Fig. 94)** et externes **(Fig. 95)** montrent *comment les ménisques viennent s'interposer entre condyles et glènes*, sauf au centre de chaque glène et au niveau des tubercules intercondylaires, comment ils sont reliés à la patella par les rétinaculums patellaires **9** et à la capsule **c**, et comment ils délimitent *deux étages dans l'articulation* : l'**étage supraméniscal** et l'**étage inframéniscal** **(Fig. 93)**.

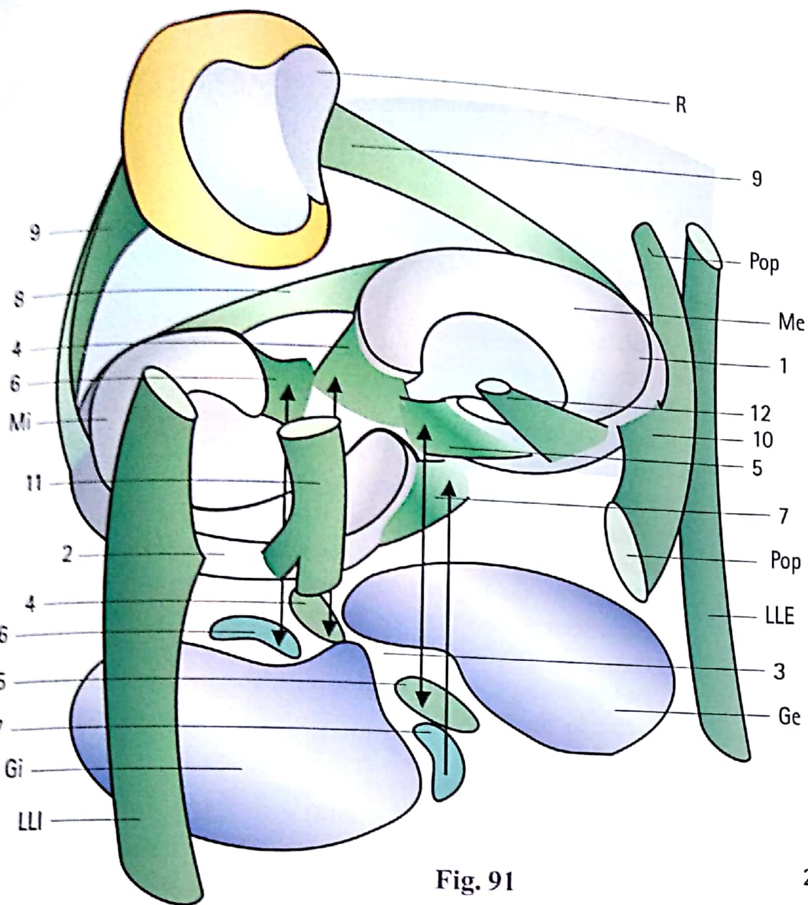


Fig. 91

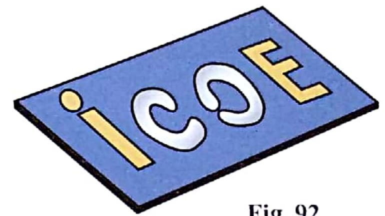


Fig. 92

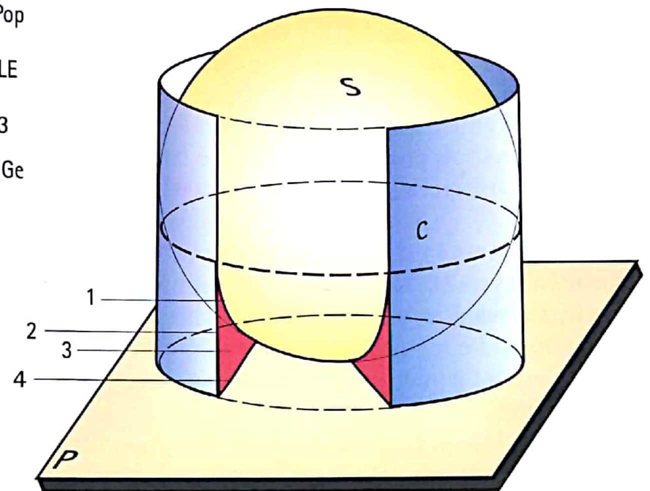


Fig. 90

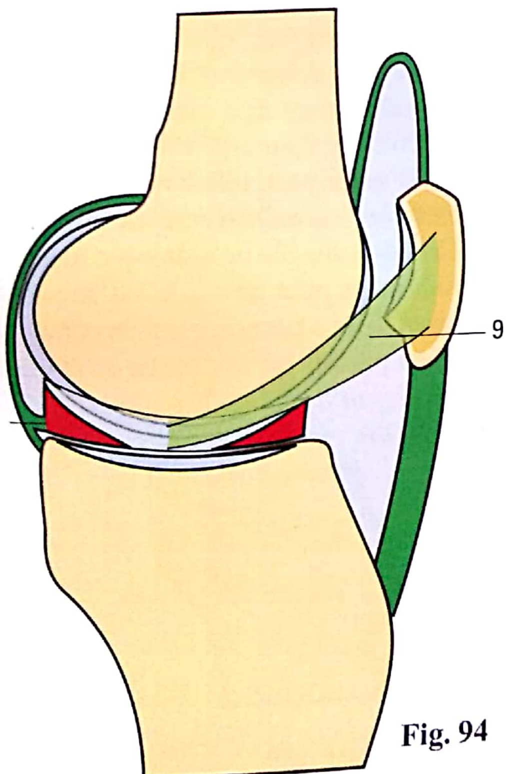


Fig. 94

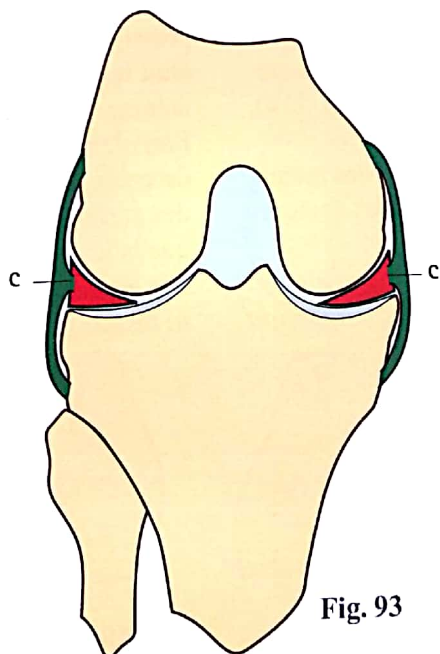


Fig. 93

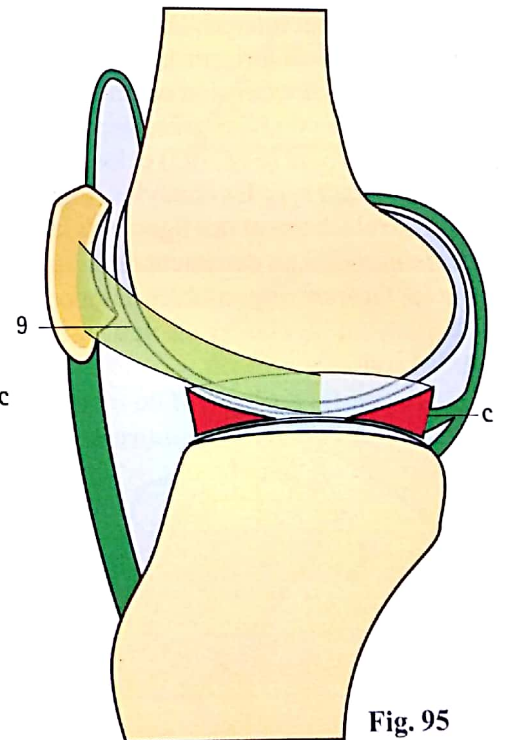


Fig. 95

Déplacements des ménisques lors de la flexion-extension

Nous avons vu (p. 94) que le point de contact entre les condyles et les glènes recule sur les glènes lors de la flexion et avance lors de l'extension. Les ménisques sont amenés à suivre ce mouvement et cela est bien visible sur une préparation anatomique où l'on a simplement gardé les ligaments et les ménisques. **En extension (Fig. 96 : vue postéro-interne)**, la partie postérieure des glènes est découverte, surtout la glène externe **Ge**. **En flexion (Fig. 97 : vue postéro-interne)**, les ménisques **Me** et **Mi** viennent couvrir la partie postérieure des glènes, *surtout le ménisque externe* qui descend sur le versant postérieur de la glène externe.

Une **vue schématique supérieure des ménisques sur les glènes** montre qu'à partir de la position en extension **(Fig. 98)**, les ménisques, qui sont en position antérieure, reculent en position de flexion **(Fig. 99)**, mais inégalement, car le ménisque externe **Me** a reculé deux fois plus que le ménisque interne **Mi**. En effet, la course du ménisque interne est de 6 mm et celle de l'externe est de 12 mm.

Ces schémas montrent en outre qu'en même temps qu'ils reculent, **les ménisques se déforment**. Ceci est dû au fait qu'ils ont **deux points fixes**, l'insertion de leurs cornes, alors que tout le reste est mobile. Le ménisque externe se déforme et se déplace plus que l'interne parce que les insertions de ses cornes sont plus rapprochées.

Les ménisques jouent certainement un rôle important comme joints élastiques transmettant les efforts de compression entre le fémur et le tibia **(flèches noires, Fig. 101 et 102)** : il est remarquable qu'**en extension**, les condyles présentent sur les glènes leur plus grand rayon de courbure **(Fig. 100)** et que les ménisques sont étroitement interposés entre les surfaces articulaires. Ces deux éléments favorisent la transmission des efforts de compression lors de l'extension complète du genou. Par contre, **dans la flexion**, les condyles présentent sur les glènes leur plus petit rayon de courbure **(Fig. 103)** et les ménisques perdent partiellement le contact avec les condyles **(Fig. 105)** : ces deux éléments, avec le relâchement des ligaments latéraux (voir p. 114), *favorisent la mobilité* au détriment de la stabilité.

Quels sont les facteurs responsables des mouvements des ménisques ? Ils peuvent se classer en **deux groupes** : les facteurs passifs et les actifs.

Il n'y a qu'un seul **facteur passif** du mouvement de translation des ménisques : les condyles *repoussent les ménisques devant eux*, un peu à la manière d'un noyau de cerise chassé entre deux doigts. Ce mécanisme, qui peut paraître simpliste, est tout à fait évident lorsqu'on mobilise une préparation anatomique où toutes les connexions des ménisques ont été coupées *sauf les insertions des cornes* **(Fig. 96 et 97)** : les surfaces sont très glissantes et le « coin » du ménisque est expulsé entre la « roue » du condyle et le « sol » de la glène (ce serait donc une cale tout à fait inefficace).

Les **facteurs actifs** sont nombreux.

- **Lors de l'extension (Fig. 101 et 102)**, les ménisques sont *tirés en avant par les rétinaculums patellaires* **1** tendus par l'avancée de la patella (voir p. 109), qui entraîne aussi le ligament transverse du genou. En outre, la corne postérieure du ménisque externe **(Fig. 102)** est rappelée en avant par la tension du ligament ménisco-fémoral **2**, simultanée avec la tension du ligament croisé postéro-interne (voir p. 129).
- **Lors de la flexion :**

– le ménisque interne **(Fig. 104)** est tiré en arrière par l'expansion du muscle semi-membraneux **3** qui s'insère sur son rebord postérieur, tandis que la corne antérieure est rappelée par des fibres du croisé antéro-externe **4** qui s'attachent sur elle ;

– le ménisque externe **(Fig. 105)** est tiré en arrière par l'expansion du muscle poplité **5**.

Le rôle de joint de transmission des contraintes de compression entre le fémur et le tibia a été sous-estimé jusqu'à ce que les premiers opérés ayant subi des méniscectomies « de principe » commencent à développer des arthroses avant l'âge habituel pour les non-méniscectomisés. L'avènement de l'arthroscopie a constitué un grand progrès car, d'une part, elle a permis de *mieux connaître les lésions méniscales douteuses* à l'arthrographie, ou les faux-positifs, qui conduisaient à la méniscectomie « de principe » (on enlevait le ménisque pour voir s'il était lésé, ce qui était tout à fait illogique) ; d'autre part, *elle a rendu possible la méniscectomie « à la demande » ou méniscectomie partielle*, où l'on n'enlève que la partie endommagée du ménisque susceptible de créer une gêne mécanique et peut être cause d'une atteinte des surfaces cartilagineuses. Elle a permis aussi de comprendre que la lésion méniscale n'est parfois qu'une partie du diagnostic, *car bien souvent, c'est la lésion ligamentaire qui crée à la fois la lésion méniscale et la lésion cartilagineuse.*

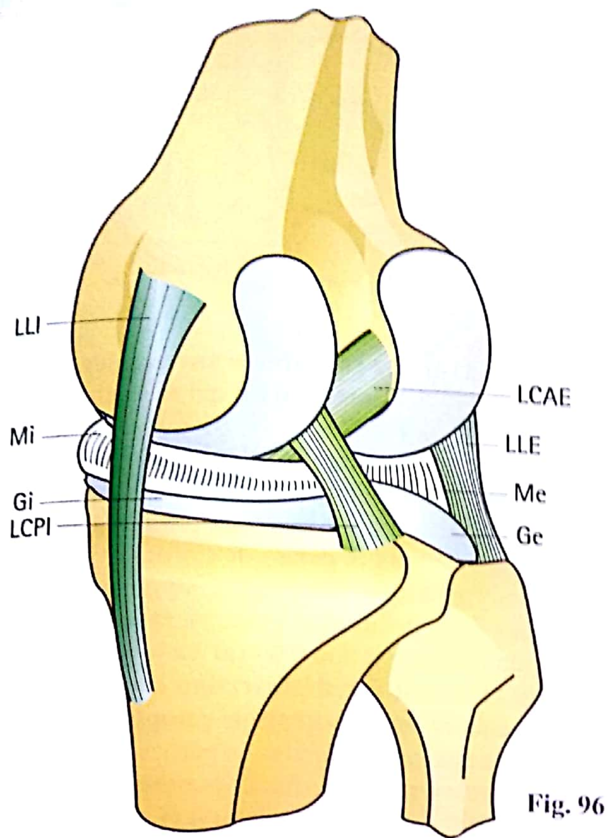


Fig. 96

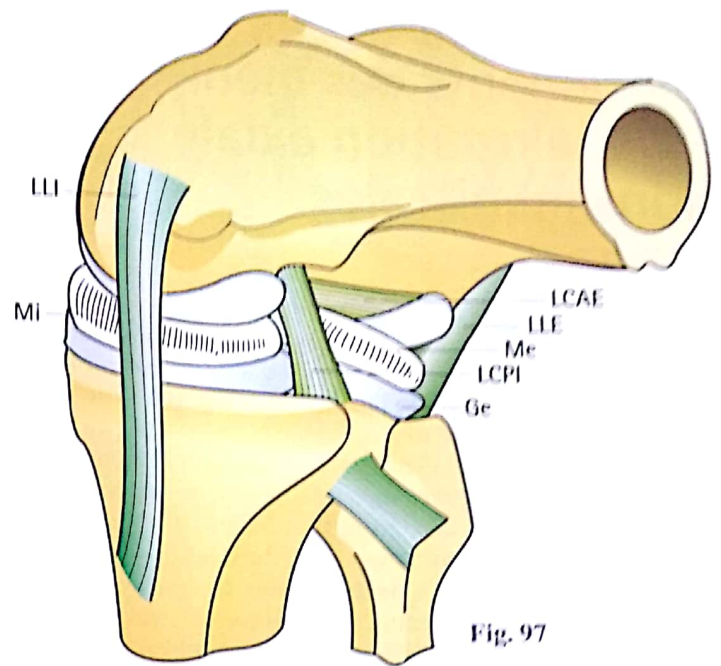


Fig. 97

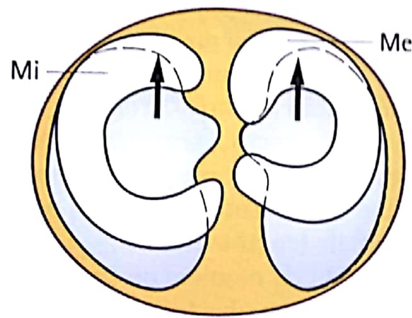


Fig. 98

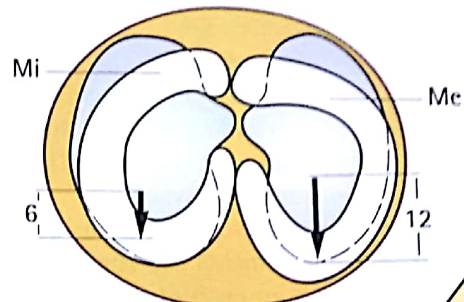
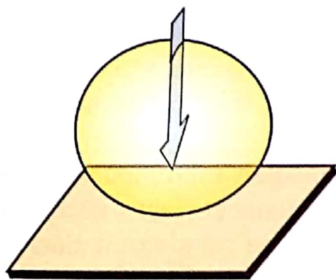
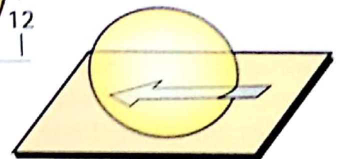


Fig. 99


Fig. 100


Fig. 103

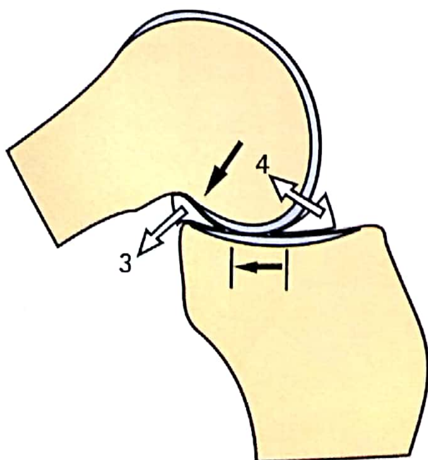


Fig. 104

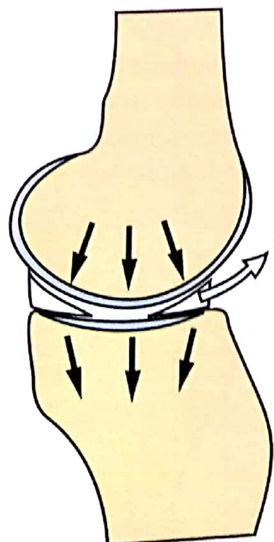


Fig. 101

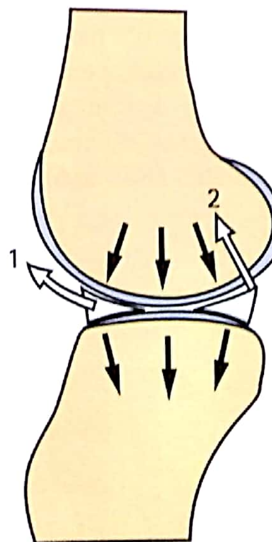


Fig. 102

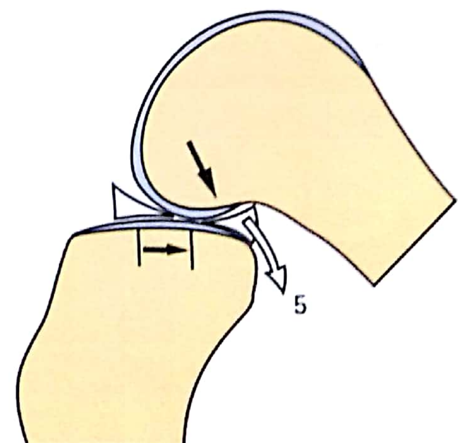


Fig. 105

Déplacements des ménisques lors de la rotation axiale Lésions méniscales

Lors des mouvements de rotation axiale, les ménisques suivent exactement les déplacements des condyles sur les glènes (voir p. 99). Dans la **position en rotation indifférente (Fig. 106 : vue schématique du plateau tibial droit)**, le ménisque externe Me et le ménisque interne Mi sont bien centrés chacun sur la glène correspondante. Lors des mouvements de rotation, on les voit suivre sur les glènes un chemin opposé :

- lors de la **rotation externe (Fig. 107 : la flèche rouge indique la rotation relative du tibia sous les condyles fémoraux)** du tibia sous le fémur, le ménisque externe Me est entraîné *vers l'avant* 1 de la glène externe, tandis que le ménisque interne Mi est entraîné *vers l'arrière* 2 ;
- lors de la **rotation interne (Fig. 108 : la flèche bleue indique la rotation inverse)**, le ménisque interne Mi *avance* 3, alors que l'externe Me *recule* 4.

Là encore, les ménisques se déplacent **tout en se déformant** autour de leurs points fixes, les insertions des cornes. *L'amplitude totale du déplacement du ménisque externe est double de celle du déplacement du ménisque interne.*

Ces déplacements méniscaux lors de la rotation axiale sont *surtout passifs* – entraînement par les condyles – mais il existe aussi un facteur actif : la *tension du rétinaculum patellaire*, due au déplacement de la patella par rapport au tibia (voir p. 107) : cette traction entraîne l'un des ménisques vers l'avant.

Au cours des mouvements du genou, les ménisques peuvent être lésés lorsqu'ils ne suivent pas les déplacements des condyles sur les glènes : ils sont alors « surpris » en position anormale et « écrasés entre l'enclume et le marteau ». C'est le cas, par exemple, lors d'un mouvement d'*extension brutale du genou* (coup de pied dans un ballon) : l'un des ménisques n'a pas le temps d'être rappelé vers l'avant **(Fig. 109)** et il est coincé entre le condyle et la glène **(double flèche blanche)** avec d'autant plus de force que l'extension applique le tibia sous le fémur. Ce mécanisme, très fréquent chez les footballeurs **(Fig. 116)**, rend compte (Fig. 114) des **ruptures transversales** a ou des **désinsertions de la corne antérieure** b qui se replie « en coin de carte de visite ».

L'autre mécanisme de lésions méniscales est constitué par une **distorsion du genou** associant (Fig. 110) un mouvement de latéralité externe 1 et une rotation externe 2 : le ménisque interne se trouve ainsi ramené vers le centre de l'articulation, sous la convexité du condyle interne. Lors de l'effort de redressement, il est surpris dans cette position et pincé entre le condyle et la glène : il se produit alors soit une **fissuration longitudinale du ménisque** (Fig. 111), soit une **désinsertion capsulaire totale** (Fig. 112), soit encore une **fissuration complexe** (Fig. 113). Dans toutes ces lésions longitudinales, la partie centrale libre du ménisque peut se relever dans la fosse intercondylaire, constituant une **lésion dite « en anse de seau »** (Fig. 111). Ce type de lésion méniscale est très fréquent chez les footballeurs lors des chutes sur une jambe repliée et chez les mineurs de fond (Fig. 117) qui, dans les veines de charbon étroites, sont obligés de travailler en position accroupie.

Un autre mécanisme de lésion méniscale est **consécutif à la rupture d'un ligament croisé**, le LCAE par exemple (Fig. 115). Le condyle interne, n'étant plus retenu vers l'arrière, vient écraser et fissurer la corne postérieure du ménisque interne, créant soit une désinsertion capsulaire postérieure, soit une fissure horizontale (cartouche).

À partir du moment où l'un des ménisques est rompu, la partie lésée ne suit plus les mouvements normaux et vient s'interposer et se coincer entre le condyle et la glène ; il s'ensuit alors un **blocage du genou** dans une position de flexion d'autant plus accentuée que la lésion méniscale est plus postérieure : *l'extension complète, même passive, devient impossible.*

Il est important de savoir que, du fait de son insuffisance de vascularisation, un ménisque lésé n'est pas susceptible de cicatriser, donc de se réparer.

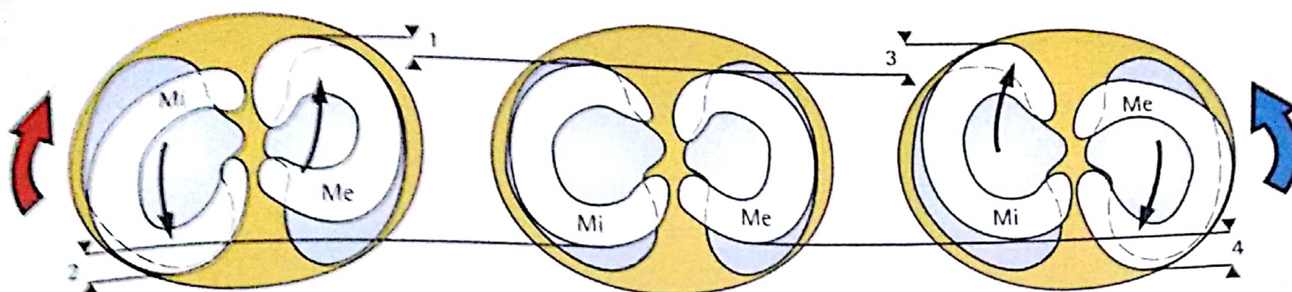


Fig. 107

Fig. 106

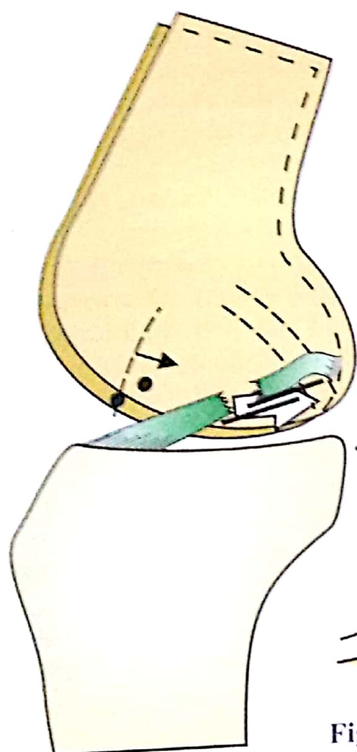
Fig. 108



Fig. 117



Fig. 116



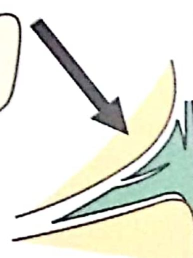


Fig. 115

1

2

Fig. 110

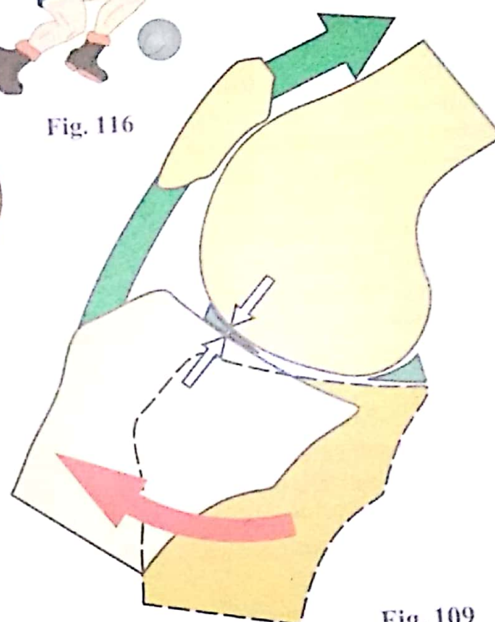


Fig. 109



Fig. 111



Fig. 112

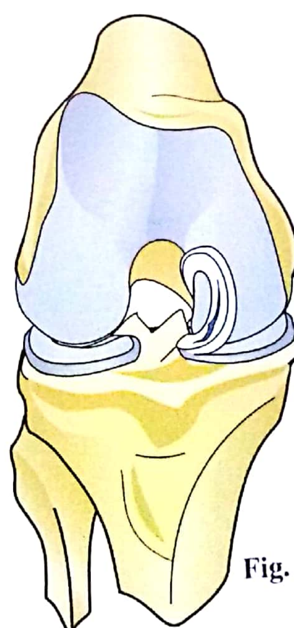


Fig. 113

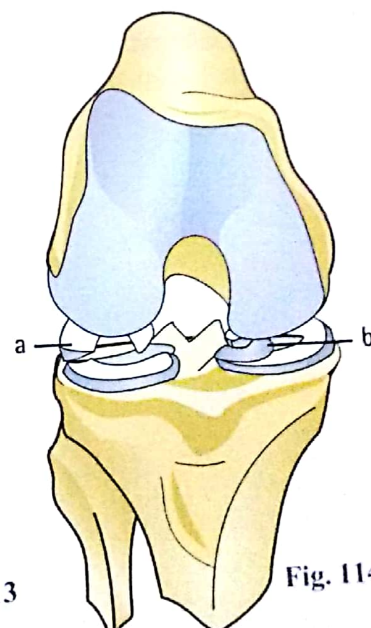


Fig. 114

Les déplacements de la patella par rapport au fémur

L'appareil extenseur du genou glisse sur l'extrémité inférieure du **fémur comme une corde dans une poulie (Fig. 118, a)**. La seule différence est que la trochlée est une poulie fixe **(Fig. 118, b)**. La trochlée fémorale et la fosse intercondylaire **(Fig. 119)** forment en effet une profonde gouttière verticale **(Fig. 118, b)** dans le fond de laquelle glisse la patella. Ainsi, la force du quadriceps dirigée obliquement en haut et légèrement en dehors se trouve-t-elle transformée en une force strictement verticale.

Le mouvement normal de la patella sur le fémur lors de la flexion est donc une translation verticale le long de la gorge de la trochlée et jusqu'à la fosse intercondylaire **(Fig. 120 : d'après radios)**. Elle se déplace ainsi de deux fois sa longueur (8 cm), tout en tournant autour d'un axe transversal ; en effet, sa face postérieure, dirigée directement en arrière en position d'extension **A**, s'oriente directement vers le haut lorsque la patella, en fin de course **B**, vient s'appliquer dans la flexion extrême sous les condyles. Il s'agit par conséquent d'une *translation circonférentielle*.

Ce déplacement important n'est possible que parce que la patella **est rattachée au fémur par des connexions de longueur suffisante**. La capsule articulaire forme autour de la patella trois profonds culs-de-sac **(Fig. 120)** : en haut le cul-de-sac subquadricipital **Sq** et de chaque côté, les culs-de-sac latéro-patellaires **Lr**. Lorsque la patella glisse sous les condyles de A en B, les trois culs-de-sac se déplissent : c'est grâce à la profondeur du cul-de-sac subquadricipital que la distance **XX'** peut devenir **XX"** (soit quatre fois plus) ; c'est aussi grâce à la profondeur des culs-de-sac latéro-patellaires que la distance **YY'** peut devenir **YY"** (soit deux fois plus).

Lorsque l'inflammation soude les deux feuillets des culs-de-sac, ceux-ci perdent toute profondeur et **la patella est attachée de court sur le fémur** : les longueurs **XX'** et **YY'** deviennent inextensibles et la patella ne peut plus glisser dans sa gouttière. Cette **rétraction capsulaire** est une des causes de la raideur du genou en extension après les traumatismes ou les infections.

Lors de sa « descente » la patella est accompagnée par le ligament adipeux **(Fig. 121)** qui passe de la position **ZZ'** à la position **ZZ"**, changeant ainsi son orientation de 180°. Lorsque la patella « remonte », le cul-de-sac subquadricipital viendrait se coincer entre patella et trochlée s'il n'était tendu vers le haut par quelques fibres détachées de la face profonde du muscle fémoral, et qu'on appelle le **muscle articulaire du genou** Msc ou encore tenseur du cul-de-sac subquadricipital.

Normalement, la patella ne se déplace que de haut en bas et non transversalement. Elle est en effet très fortement appliquée **(Fig. 122)** dans sa rainure par le quadriceps, et ce d'autant plus que la flexion est plus accentuée. En fin d'extension **(Fig. 123)**, cette force de coaptation diminue et en hyperextension **(Fig. 124)**, elle a même tendance à s'inverser, c'est-à-dire à *décoller la patella* de la trochlée. À ce moment **(Fig. 125)**, la patella a tendance à être *chassée en dehors*, car le tendon quadricipital et le ligament patellaire forment un angle obtus ouvert en dehors. Ce qui empêche la luxation de la patella en dehors, c'est la joue externe de la trochlée, nettement plus saillante **(Fig. 126)** que l'interne (différence = **e**). Si par malformation congénitale **(Fig. 127)** la *joue externe est moins développée*, ce qui veut dire *pas plus saillante* ou *moins saillante* que l'interne, la patella n'est plus assez maintenue est se luxe en dehors lors de l'extension complète. C'est le mécanisme de la **luxation récidivante de la patella**.

La torsion externe du tibia sous le fémur ainsi que le genu valgum, en diminuant l'angle entre le tendon quadricipital et le ligament patellaire, augmentent la composante dirigée en dehors et *favorisent l'instabilité externe de la patella*. Ce sont donc des facteurs de luxation et de subluxation externes, de chondromalacie patellaire (ramollissement du cartilage) et d'arthrose fémoro-patellaire externe.

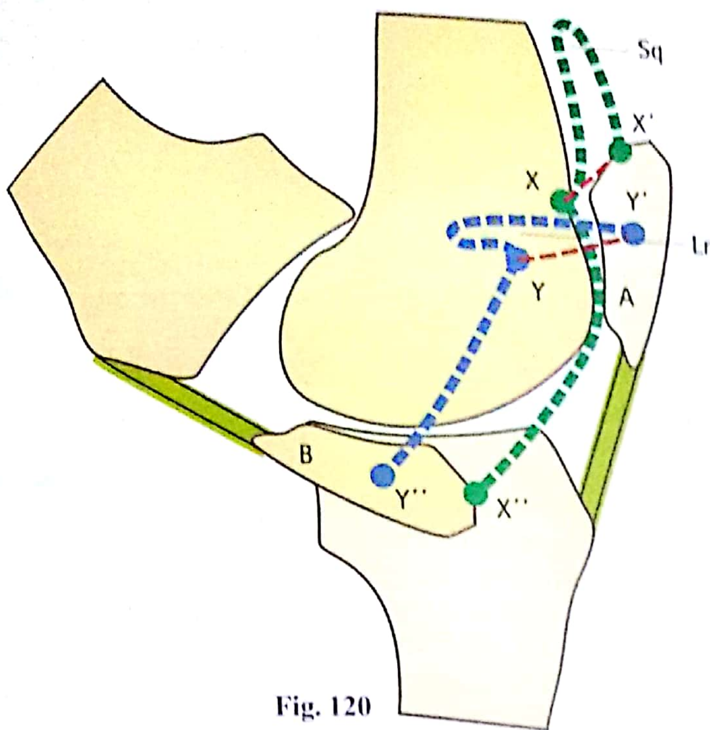


Fig. 120

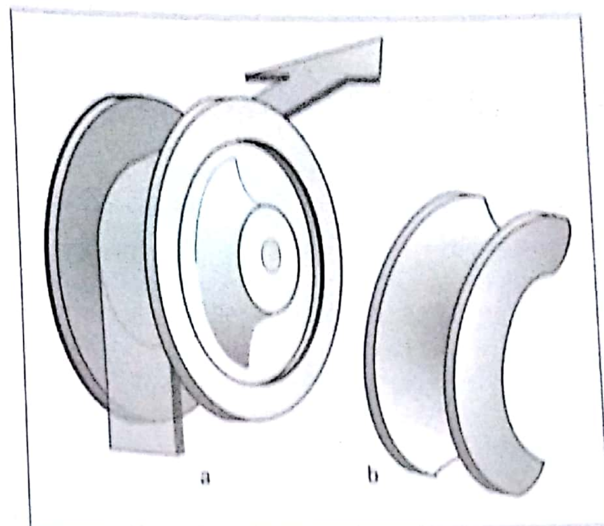


Fig. 118

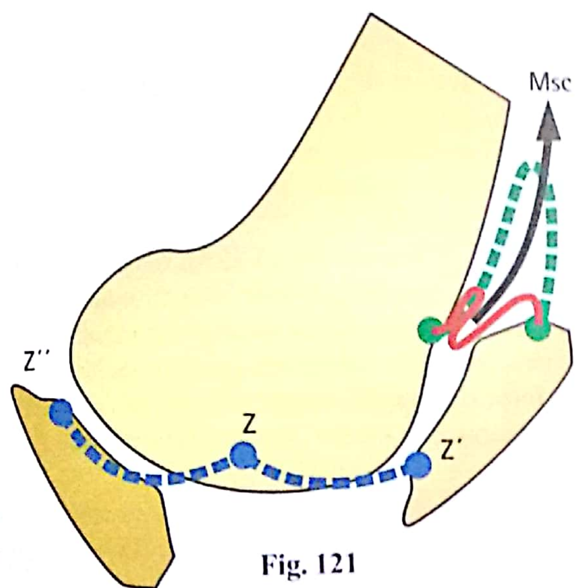
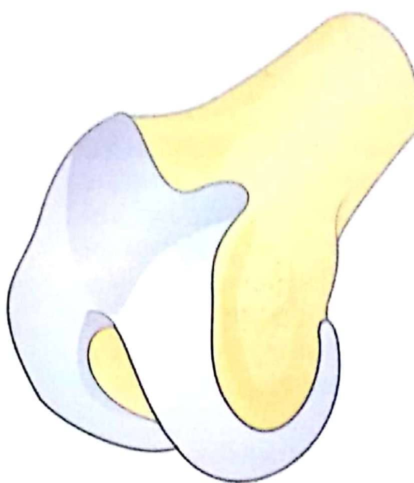


Fig. 121


Fig. 119

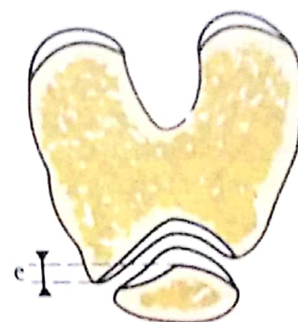
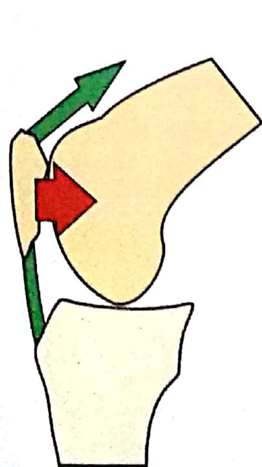
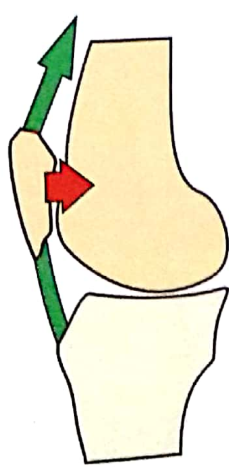
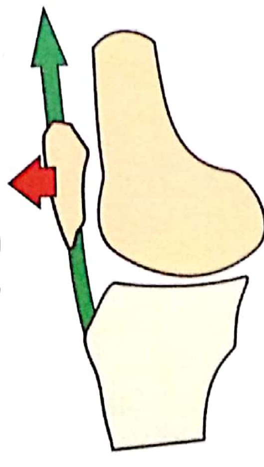
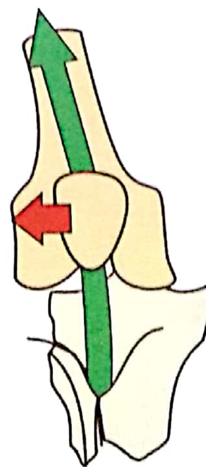


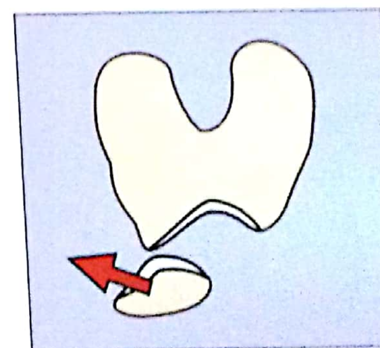
Fig. 126


Fig. 122


Fig. 123


Fig. 124


Fig. 125


Fig. 127

Les rapports fémoro-patellaires

La **face postérieure de la patella (Fig. 128 : vue postérieure d'une patella droite)** est recouverte d'un **cartilage très épais** (4 à 5 mm) surtout au niveau de la crête médiane **1** : c'est la plus grande épaisseur de cartilage de tout l'organisme. Ceci s'explique fort bien par les pressions considérables (300 kg) qui s'exercent à ce niveau lors de la contraction du quadriceps sur genou fléchi, par exemple à la descente des escaliers ou au relèvement de la position accroupie. On peut imaginer la pression qui s'exerce sur les patellas des haltérophiles qui soulèvent des charges de plus de 120 kg !

La **crête médiane** sépare **deux facettes** concaves dans les deux sens :

- la **facette externe 2**, en rapport avec la joue externe de la trochlée ;
- la **facette interne**, en rapport avec la joue interne.

La facette interne est subdivisée par une crête oblique peu saillante, en une facette principale **3** et une facette accessoire **4**, située à l'angle supéro-interne et qui s'articule avec la bordure interne de la fosse intercondylaire *dans la flexion extrême*.

Lors de son déplacement longitudinal le long de la trochlée, **pendant la flexion (Fig. 129)**, la patella entre en contact avec la trochlée par sa partie inférieure **1** en extension complète, par sa partie moyenne **2** en flexion à 30° et par sa partie supérieure **3** et la facette supéro-externe en flexion complète. Il est donc possible, en observant la topographie des lésions cartilagineuses, de connaître l'*angle critique de flexion*, et, vice versa, en notant l'*angle de flexion douloureuse*, de prévoir le siège des lésions.

Jusqu'à maintenant, les rapports de l'articulation fémoro-patellaire étaient précisés par des radiographies dites « en incidence axiale de la patella » ou encore en « incidence fémoro-patellaire », prenant l'interligne « en enfilade » : sur le même film sont prises les deux patellas, les genoux étant successivement fléchi à 30° **(Fig. 130)**, à 60° **(Fig. 131)** et à 90° **(Fig. 132)** afin d'explorer l'articulation sur toute sa hauteur.

Ces clichés en incidences fémoro-patellaires permettent d'apprécier :

- le **centrage de la patella**, surtout sur le cliché à 30°, par la correspondance entre la crête patellaire et la gorge trochléaire, et par le **débord de l'angle externe** de la patella par rapport à la limite de la joue externe ; ceci permet de reconnaître une **subluxation externe** ;
- la **diminution d'épaisseur de l'interligne**, surtout dans sa partie externe, par comparaison avec le côté supposé sain et en utilisant un compas à pointes sèches ; on reconnaît ainsi une érosion cartilagineuse dans les arthroses déjà « avancées » ;
- la **densification osseuse sous-chondrale** au niveau de la facette externe, traduisant un syndrome d'hyperpression externe ;
- un **décalage en dehors de la tubérosité tibiale antérieure** par rapport à la gorge de la trochlée ; ce signe, appréciable seulement sur les clichés à 30° et 60°, révèle une *torsion externe* du tibia sous le fémur lors des subluxations et des hyperpressions externes.

Actuellement, grâce au scanner et à l'IRM, on peut pratiquer des coupes de l'articulation fémoro-patellaire en extension complète et même en hyperextension, ce qui était impossible avec la radiographie ; ceci montre la subluxation externe de la patella au moment où la force de coaptation est nulle ou même négative, permettant de reconnaître les **instabilités fémoro-patellaires mineures**.

Quant à l'**arthroscopie**, elle montre les *lésions cartilagineuses* fémoro-patellaires n'apparaissant pas sur les clichés en incidence axiale et les *déséquilibres dynamiques*.

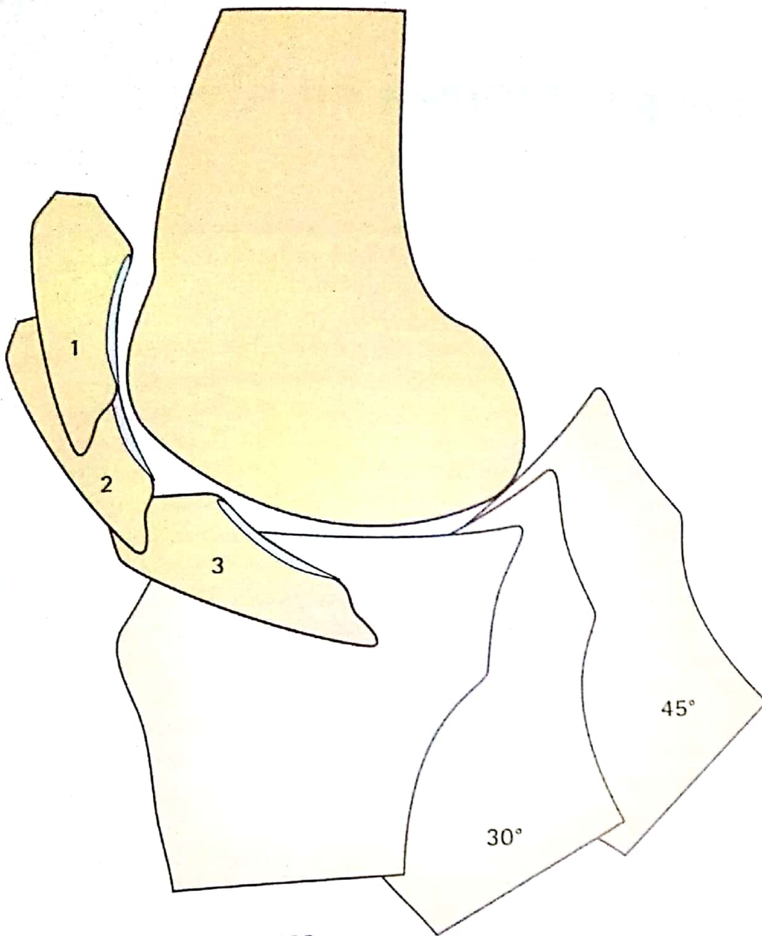


Fig. 129

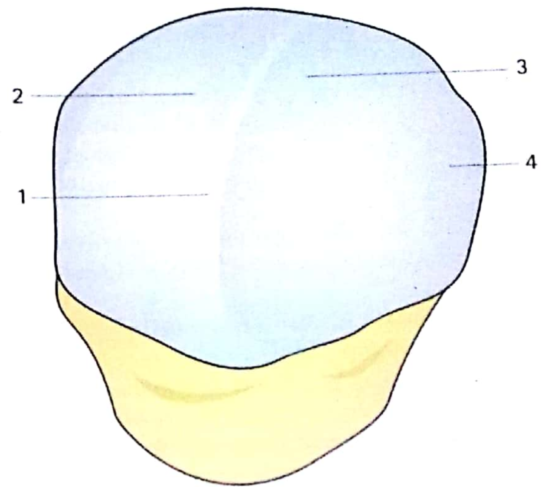


Fig. 128

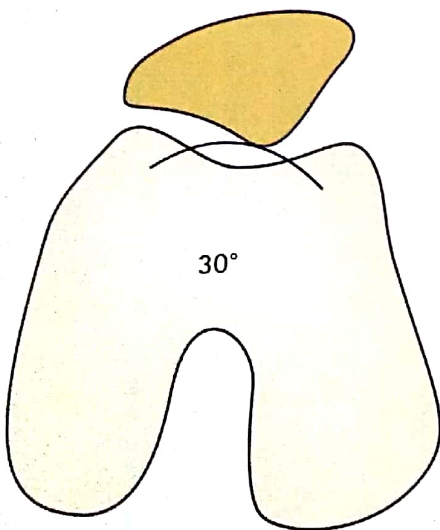


Fig. 130

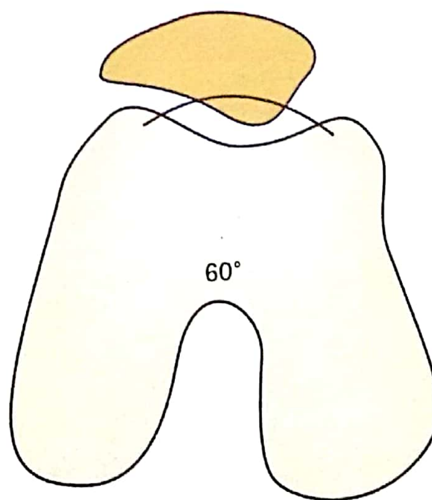


Fig. 131

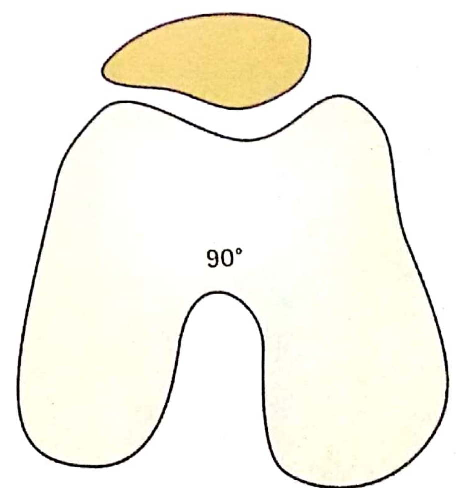


Fig. 132

Les déplacements de la patella par rapport au tibia

On pourrait imaginer la patella soudée au tibia et formant un **olécrane (Fig. 133)**, comme au coude. Cette disposition empêcherait tout mouvement de la patella par rapport au tibia et limiterait notablement sa mobilité, empêchant même tout mouvement de rotation axiale.

La patella effectue en effet **deux sortes de mouvements par rapport au tibia**, suivant qu'on considère la flexion-extension ou la rotation axiale.

Lors des **mouvements de flexion-extension (Fig. 134)**, la patella se déplace *dans un plan sagittal*.

À partir de sa **position en extension** A, elle recule en se déplaçant le long d'un arc de cercle dont le centre est situé au niveau de la tubérosité tibiale O et dont le rayon est égal à la longueur du ligament patellaire. Ce faisant, elle a basculé sur elle-même de 35° environ, de telle sorte que sa face postérieure, qui regardait en arrière, est orientée lors de la **flexion extrême** B en arrière et en bas. Elle subit donc aussi par rapport au tibia un *mouvement de rotation* ou encore de *translation circonférentielle*. Ce recul de la patella est la conséquence de deux facteurs : d'une part le déplacement vers l'arrière D du point de contact des condyles sur les glènes, d'autre part la diminution r de la distance R de la patella à l'axe de flexion-extension (+).

Lors des **mouvements de rotation axiale (Fig. 135, 136 et 137)**, les déplacements de la patella par rapport au tibia se situent *dans un plan frontal*. En position de **rotation indifférente (Fig. 135)**, la direction du ligament patellaire est légèrement oblique en bas et en dehors. Lors de la **rotation interne (Fig. 136)**, le fémur tourne en rotation externe par rapport au tibia, entraînant la patella *en dehors*. Le ligament patellaire devient *oblique en bas et en dedans*. Lors de la **rotation externe (Fig. 137)**, l'inverse se produit ; le fémur entraîne la patella *en dedans*, si bien que le ligament patellaire est *oblique en bas et en dehors*, mais plus oblique en dehors qu'en position de rotation indifférente.

Les déplacements de la patella par rapport au tibia sont donc indispensables tant pour les mouvements de flexion-extension que pour les mouvements de rotation axiale.

Nous avons démontré grâce à un modèle mécanique (voir modèle II en fin du volume) que c'est la patella qui modèle la trochlée et le profil antérieur des condyles. Dans ses déplacements, la patella est en effet *reliée au tibia par le ligament patellaire* et *au fémur par les rétinaculums patellaires* (voir page suivante). Lorsqu'au cours de la flexion du genou, les condyles effectuent leur mouvement sur les glènes, la face postérieure de la patella, entraînée par ses connexions ligamentaires, engendre géométriquement le profil antérieur des condyles, qui est la courbe enveloppante des positions successives de la face postérieure de la patella. Le profil antérieur des condyles dépend donc essentiellement des liaisons mécaniques de la patella et de leur disposition, de même que leur profil postérieur dépend des ligaments croisés.

Nous avons vu (page 86) comment le profil condylo-trochléaire est littéralement « usiné » par le tibia et la patella, rattachés au fémur par le système des croisés d'une part, et par le ligament et les rétinaculums patellaires d'autre part.

Certaines opérations, en *transposant la tubérosité tibiale en avant* (Maquet) ou *en dedans* (Elmslie) modifient les rapports entre la patella et la trochlée, en particulier la composante de coaptation et la composante de subluxation externe, ce qui explique qu'elles puissent être utilisées dans les syndromes patellaires.

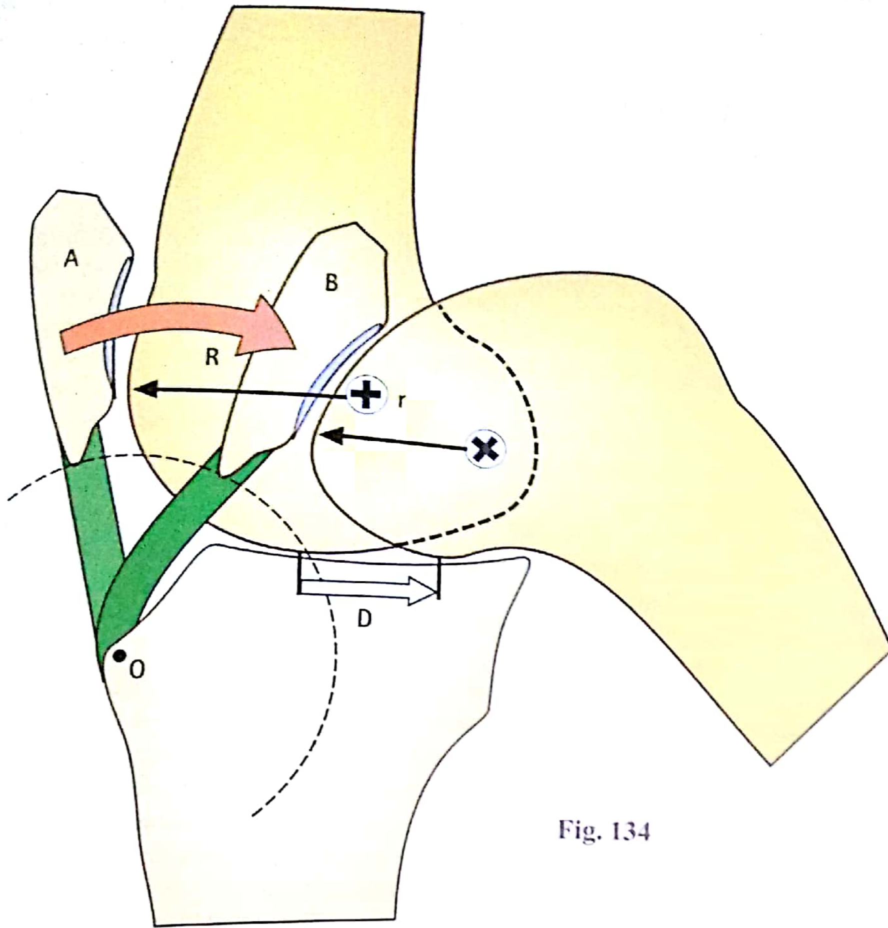


Fig. 134

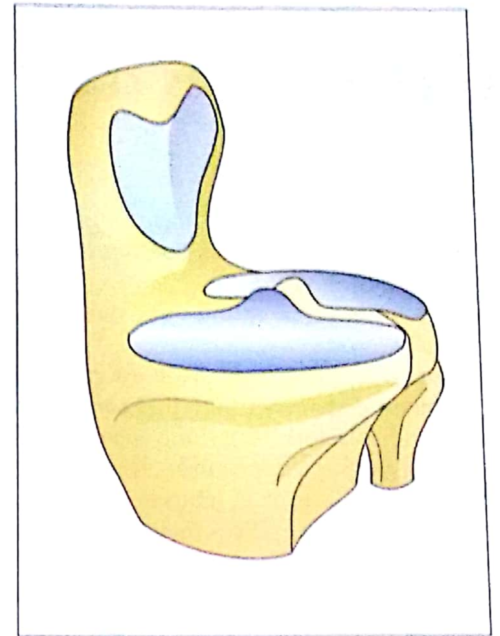


Fig. 133

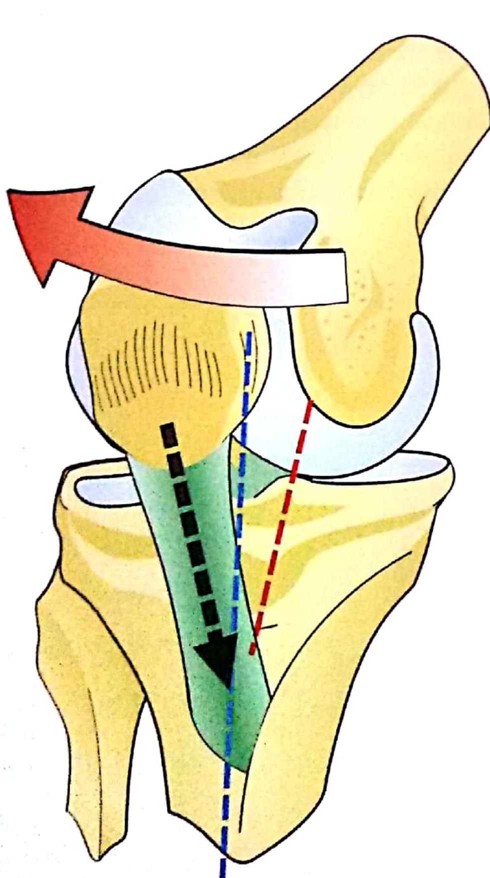


Fig. 136

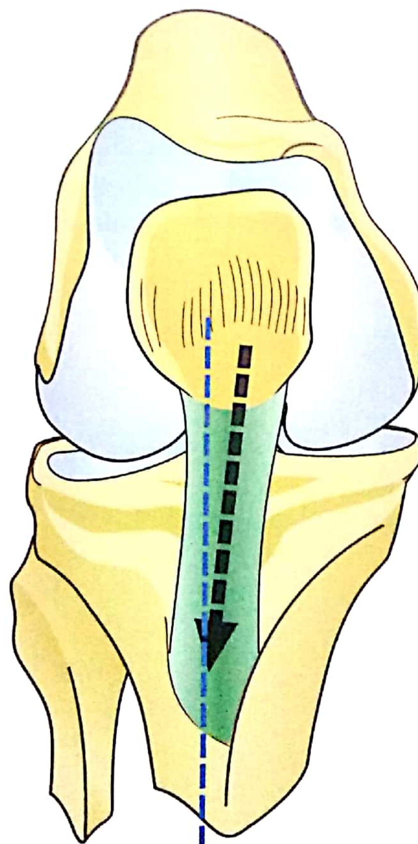


Fig. 135

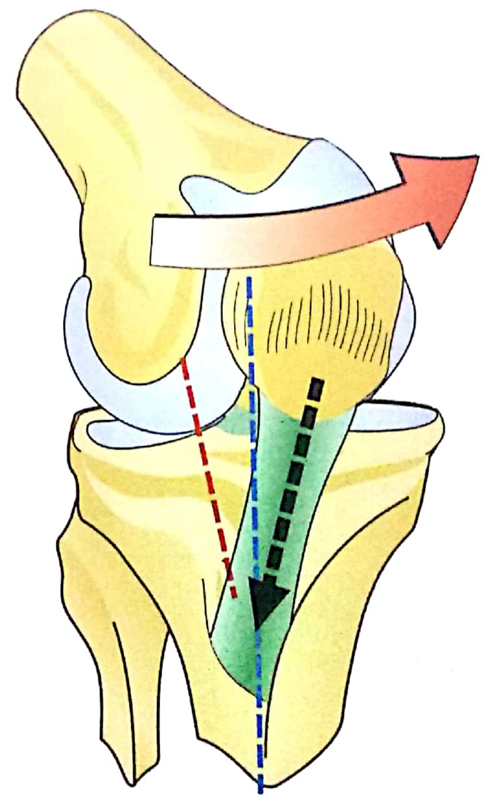


Fig. 137

Les ligaments collatéraux du genou

La stabilité de l'articulation du genou est sous la dépendance de puissants ligaments, les ligaments croisés et les ligaments collatéraux.

Les ligaments collatéraux renforcent la capsule articulaire *du côté interne et du côté externe*.

Ils assurent la **stabilité latérale du genou en extension**.

Le **ligament collatéral tibial (Fig. 138)** s'étend de la face cutanée du condyle interne à l'extrémité supérieure du tibia **LLI** :

- son *insertion supérieure* est située à la partie postéro-supérieure de la face interne, en arrière et au-dessus de la ligne des centres de courbure **XX'** du condyle (voir p. 85) ;
- son *insertion inférieure* se trouve en arrière du champ d'insertion des muscles de la patte d'oie (voir p. ••) sur la face interne du tibia ;
- il est *oblique en bas et en avant*, sa direction est donc *croisée dans l'espace avec celle du ligament latéral externe* **(flèche A)**.

Le **ligament latéral fibulaire (Fig. 139)** est étendu de la face latérale du condyle externe à la tête de la fibula **LLE** :

- son *insertion supérieure* est située au-dessus et en arrière de la ligne des centres de courbure **yy'** du condyle externe (voir p. 85) ;
- son *insertion inférieure* s'effectue sur le champ antérieur de la tête de la fibula, à l'intérieur de la zone d'insertion du muscle biceps ;
- il est distinct de la capsule sur tout son trajet ;
- il est séparé de la face périphérique du ménisque externe par le passage du tendon du muscle poplité, qui prend part à la formation du **point d'angle postéro-externe** ou **PAPE** ;
- il est *oblique en bas et en arrière*, sa direction est donc *croisée dans l'espace avec celle du ligament collatéral tibial* **(flèche B)**.

Sur ces deux schémas **(Fig. 138 et 139)** ont été dessinés les ailerons ménisco-rotuliens **1** et **2** et les ailerons rotuliens 3 et 4, qui maintiennent la patella contre la trochlée fémorale.

Les ligaments collatéraux sont **tendus lors de l'extension (Fig. 140 et 142)** et **détendus dans la flexion (Fig. 141 et 143)**.

Sur les schémas **(Fig. 140 et 141)** apparait la différence de longueur **d** du ligament collatéral tibial entre la position d'extension et la position de flexion. Par ailleurs, l'obliquité vers l'avant et le bas est un peu plus marquée. Du côté du ligament collatéral fibulaire **(Fig. 142 et 143)**, on peut aussi mettre en évidence une *différence de longueur* **e** du ligament collatéral fibulaire et un changement de direction : d'oblique en bas et en arrière, le ligament devient plus vertical.

Le changement de tension des ligaments peut facilement être explique par un **mécanisme de coin** et illustré par un modèle mécanique **(Fig. 144)** : un coin **C** glisse de la position **1** à la position 2 sur une planche **B** ; ce coin est engagé sous un « étrier » **ab** fixé en **a** sur la planche **B**. Lorsque le coin **C** glisse de 1 en 2, il tend l'étrier, qu'on suppose être *élastique* et qui prend une *nouvelle longueur* **ab'** ; la différence de longueur **e** correspond à la différence d'épaisseur du coin entre ses deux positions 1 et 2, et représente le *degré de tension* de l'étrier, et par image, des ligaments.

En ce qui concerne le genou, à mesure que l'extension se complète, *le condyle vient s'interposer comme un coin* entre la glène et l'insertion supérieure du ligament collatéral. Le condyle joue le rôle d'un coin parce que *son rayon de courbure augmente régulièrement d'arrière en avant* et que les ligaments collatéraux se fixent dans la concavité de la ligne des centres de courbures. La position de flexion à 30° qui détend les ligaments collatéraux est la position d'immobilisation après suture des ligaments collatéraux.

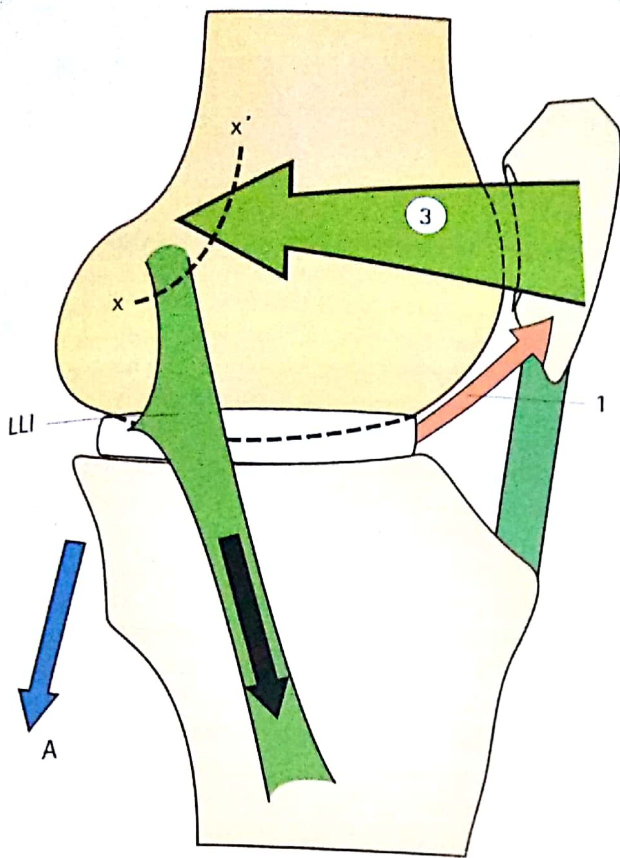


Fig. 138

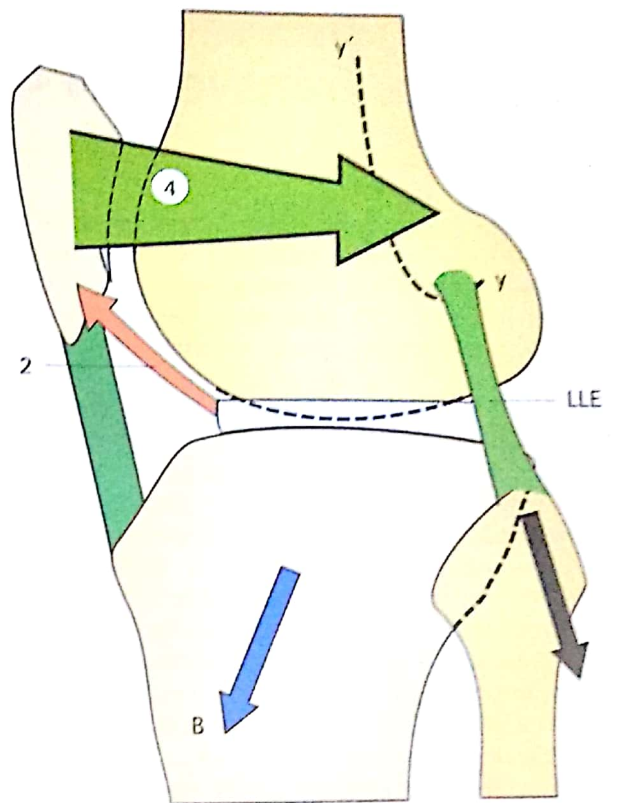


Fig. 139

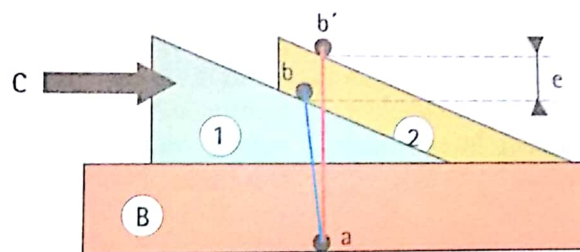
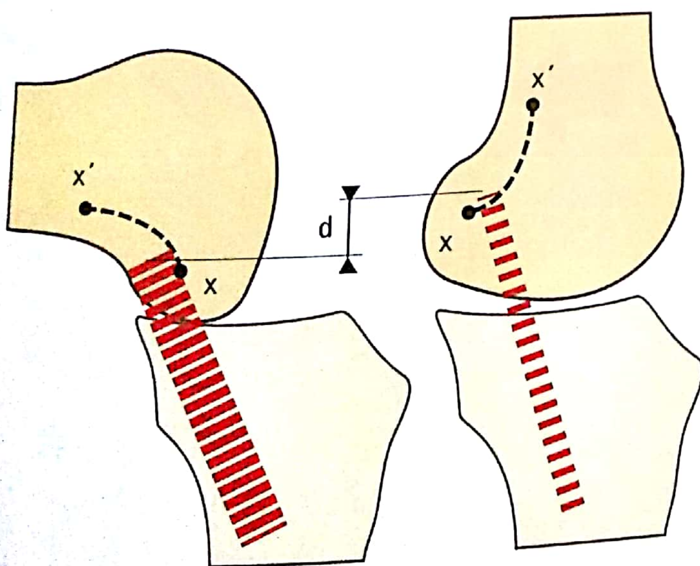


Fig. 144



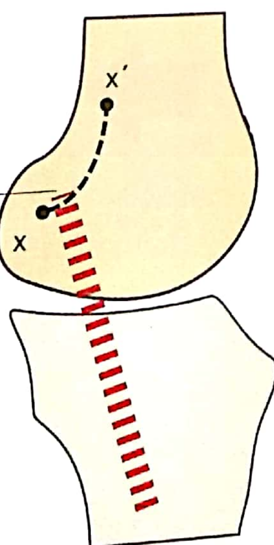
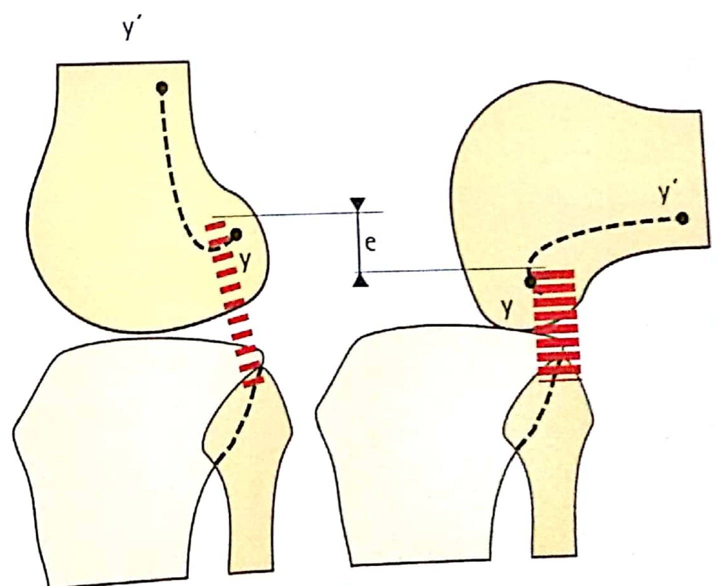


Fig. 141

Fig. 140



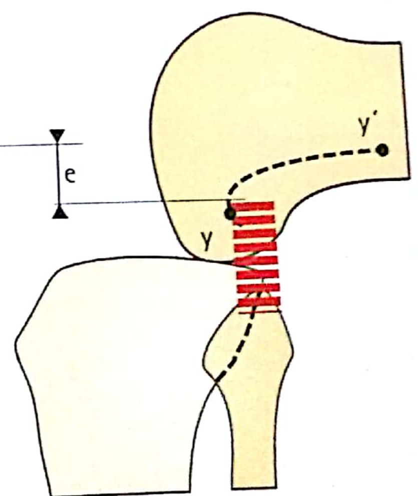


Fig. 142

Fig. 143

La stabilité transversale du genou

Le genou subit d'importants efforts latéraux et la **structure trabéculaire des extrémités osseuses (Fig. 145 : coupe fontale du genou)** traduit ces contraintes mécaniques. En effet, comme pour l'extrémité supérieure du fémur, on trouve des **systèmes de travées osseuses** qui matérialisent les lignes de force mécanique :

- l'**extrémité inférieure du fémur**, structurée par deux systèmes trabéculaires, l'un part de la corticale interne et s'épanouit dans le condyle homolatéral (fibres de compression) et dans le condyle controlatéral (fibres de traction) ; l'autre part de la corticale externe et réalise une disposition symétrique. Un système de *travées horizontales* unit les deux condyles ;
- l'**extrémité supérieure du tibia** possède une structure semblable avec *deux systèmes obliques* partant des corticales externe et interne et s'épanouissant sous la glène homolatérale (fibres de compression) et sous la glène controlatérale (fibres de traction) ; des travées horizontales unissent les deux glènes.

Le genu valgus physiologique **(Fig. 146 : vue du genou de face)** se caractérise par l'inclinaison de l'axe fémoral en bas et en dedans. La force F appliquée par le fémur sur l'extrémité supérieure du tibia n'est pas strictement verticale. Elle se décompose en deux composantes : une force verticale **v** et une force transversale **t** dirigée horizontalement en dedans. Cette composante **t**, en repoussant l'articulation vers le dedans, a tendance à exagérer le valgus en faisant bâiller l'interligne d'un angle **a** ouvert en dedans. **C'est le système ligamentaire interne qui s'oppose normalement à une telle dislocation.**

L'**angle de valgus** joue un grand rôle sur la **stabilité transversale du genou**. La composante transversale **t** est d'autant plus forte que le valgus est plus accentué **(Fig. 147 : schéma de décomposition des forces suivant l'angle de valgus)** :

- l'angle de valgus physiologique est de 170° **(lignes bleues)** et correspond à une composante transversale **t1** ;
- en cas de valgus exagéré, par exemple de 160°, la direction de la force **F2** va déterminer une composante transversale **t2** plus importante : elle est **deux fois plus grande** que pour un valgus normal de 170°. On en déduit que plus un genou valgum pathologique est marqué, plus il distend le système ligamentaire interne et plus il a tendance à s'accentuer.

Lors des **traumatismes portant sur les faces latérales du genou**, on peut voir se produire des fractures de l'extrémité supérieure du tibia. Si le traumatisme est appliqué sur la face interne du genou **(Fig. 148)**, il tend à redresser le valgus physiologique et détermine d'abord une **fracture de séparation du plateau tibial interne 1** ; puis, si la force n'est pas épuisée, une **rupture du ligament collatéral fibulaire 2**. Lorsque le ligament se rompt d'emblée, il ne se produit pas de fracture du plateau tibial.

Lorsque le traumatisme est appliqué sur la **face externe du genou (Fig. 149)**, par exemple par un pare-choc de voiture, le condyle externe se déplace d'abord légèrement en dedans, puis s'enfonce dans la glène externe, et enfin fait éclater la corticale externe du plateau : ainsi est réalisée la **fracture mixte** dite **tassement e – séparation s** du plateau tibial externe.

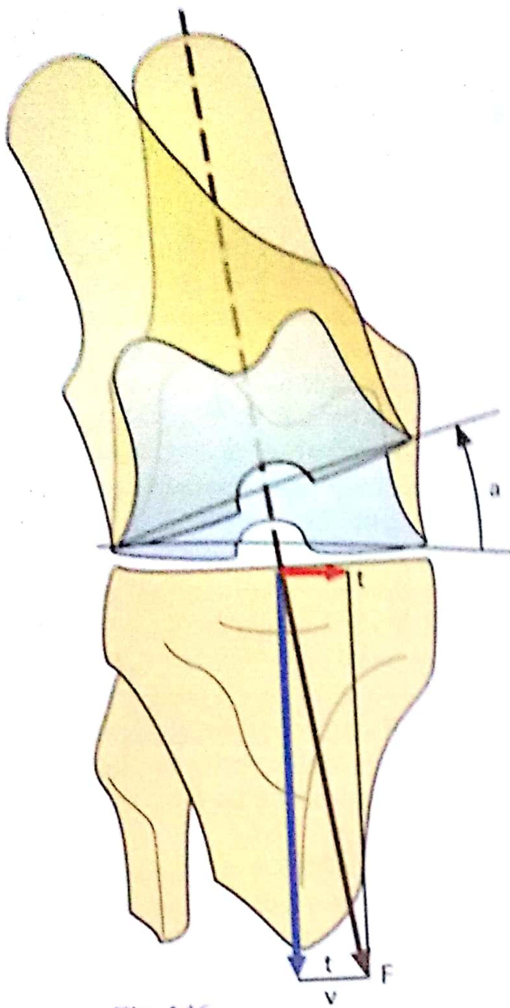


Fig. 146

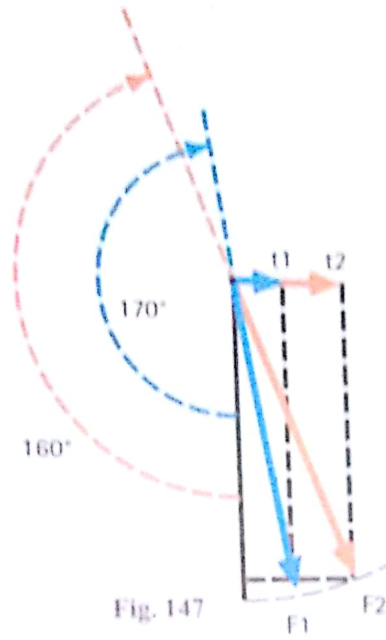
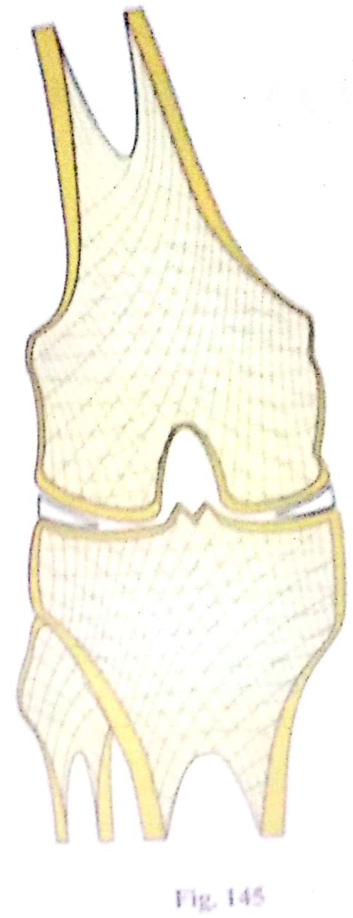


Fig. 147


Fig. 145

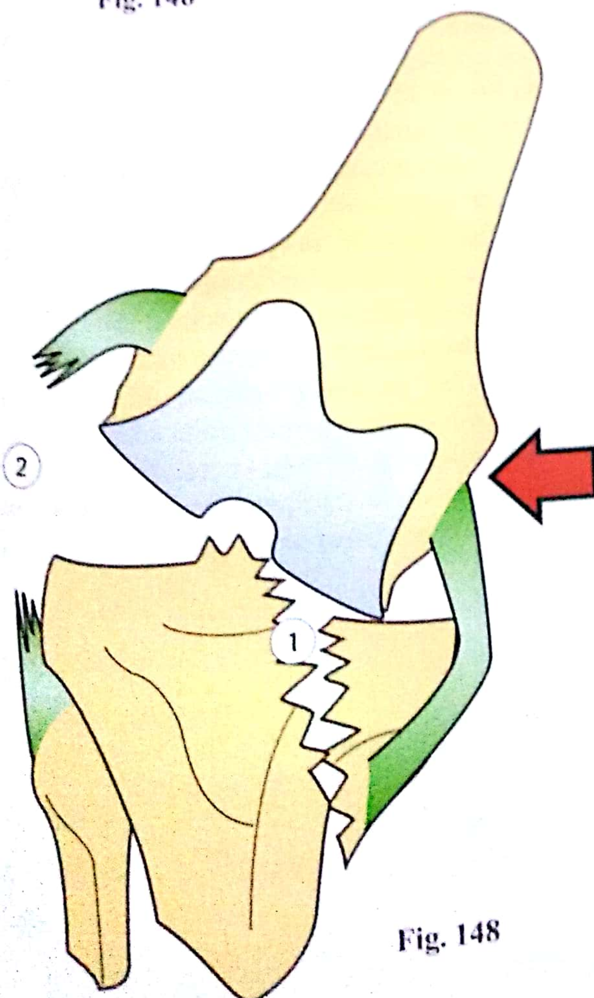


Fig. 148

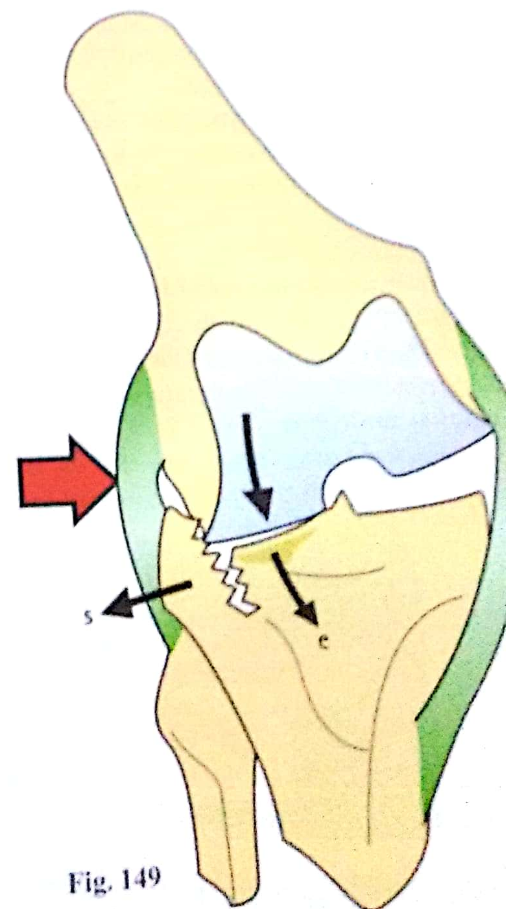


Fig. 149

La stabilité transversale du genou *(suite)*

Au cours de la marche et de la course, le genou est continuellement sollicité par des efforts latéraux. Dans certains cas, le corps est en **déséquilibre interne sur le genou porteur (Fig. 150)**, ce qui tend à exagérer le valgus physiologique et à faire bâiller l'interligne en dedans. Si l'effort transversal est trop important, le ligament collatéral tibial se rompt **(Fig. 151)** : c'est l'**entorse grave du ligament collatéral tibial**, avec bâillement de l'interligne **a** du coté interne. Il faut tempérer cette démonstration en soulignant qu'une entorse grave ne résulte jamais d'une simple position en déséquilibre et qu'elle nécessite un **choc violent**.

Dans l'autre sens, un **déséquilibre externe sur le genou porteur (Fig. 152)** tend à redresser le valgus physiologique. Si un traumatisme violent est porté sur la face interne du genou, il peut s'ensuivre une rupture du ligament collatéral fibulaire **(Fig. 153)** c'est l'**entorse grave du ligament collatéral fibulaire** avec bâillement l'interligne **b** en dehors.

Lorsqu'existe une entorse grave du genou, on peut mettre en évidence des **mouvements de latéralité** qui s'effectuent autour d'un axe antéro-postérieur. La recherche de ces mouvements anormaux se fait sur genou en extension complète et sur genou légèrement fléchi ; elle est toujours comparative avec le côté réputé sain.

Sur un **genou en extension (Fig. 155)**, on pourrait même dire en hyperextension puisque le poids du membre lui-même le porte dans cette position, si, à l'aide des deux mains, en poussant le genou latéralement, on décèle :

- un mouvement de **latéralité externe**, ou encore **en valgus**, qui traduit une rupture associée du ligament collatéral tibial **(Fig. 151)** et des formations fibro-ligamentaires situées en arrière de lui, à savoir la *coque condylienne interne* et le **PAPI** ;
- un mouvement de **latéralité interne**, ou encore en **varus** ; il s'agit d'une rupture du ligament collatéral fibulaire **(Fig. 153)** et des formations fibro-ligamentaires postérieures, essentiellement la coque condylienne externe.

Sur le genou **en flexion à 10° (Fig. 156)**, les mouvements latéraux traduisent respectivement une rupture isolée du ligament collatéral tibial ou du ligament collatéral fibulaire, car les coques condyliennes sont alors détendues par les premiers degrés de flexion. C'est parce qu'on ne peut être sûr de la position dans laquelle sont prises les radiographies qu'on ne peut se fier à la recherche radiologique d'un bâillement de l'interligne interne en valgus forcé, ou d'un bâillement externe en varus.

À vrai dire, il est très difficile d'obtenir sur un genou douloureux un *relâchement musculaire complet* propice à un examen valable. Il faut alors recourir à un examen sous anesthésie générale.

L'entorse grave du genou compromet la stabilité de l'articulation. En effet, la rupture d'un ligament collatéral ne permet pas au genou de s'opposer aux efforts latéraux qui le sollicitent continuellement **(Fig. 150 et 153)**.

Lors des efforts latéraux brutaux de la course et de la marche, les ligaments collatéraux ne sont pas seuls pour assurer la stabilité du genou ; ils sont aidés dans cette tâche par les **muscles** qui constituent de véritables **ligaments actifs de l'articulation** et jouent de ce fait un rôle de premier plan dans la stabilité du genou **(Fig. 154)**.

Le *ligament collatéral fibulaire* **LCF** est aidé puissamment par le tractus ilio-tibial ou ancienne *bandelette de Maissiat* **1**, mise en tension par le muscle tenseur du fascia lata – cette contraction apparaît sur la figure 152.

Le *ligament collatéral tibial* **LCT** est aidé de même par la contraction des **muscles de la patte d'oie** : muscles sartorius **2**, semi-tendineux **3** et gracile **4** – la contraction du muscle sartorius apparaît sur la figure 150.

Les ligaments collatéraux sont donc « doublés » par d'épais tendons. Ils sont encore aidés non moins puissamment par le **quadriceps** dont les *expansions directes* **Ed** et *croisées* **Ec** forment à la face antérieure de l'articulation un **épais surtout fibreux**. Les expansions directes s'opposent au bâillement de l'interligne du même côté et les expansions croisées empêchent son bâillement du côté opposé. Chacun des muscles vastes agit donc, grâce à ces deux types d'expansions, sur la stabilité de l'articulation dans les deux sens. On comprend alors toute *l'importance de l'intégrité du quadriceps* pour garantir la stabilité du genou, et inversement, les troubles de la statique à type de **dérobement du genou** qui résultent d'une atrophie quadricipitale.

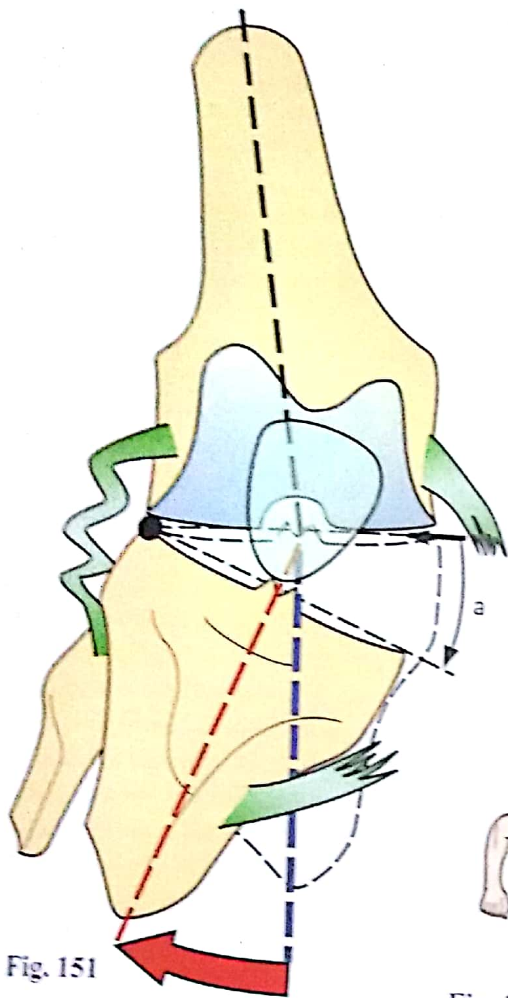


Fig. 151

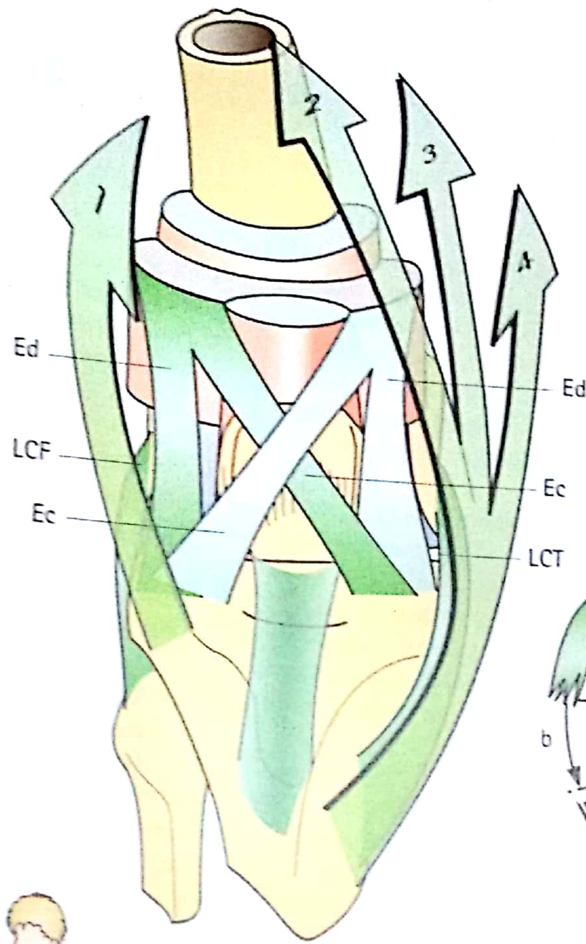


Fig. 154

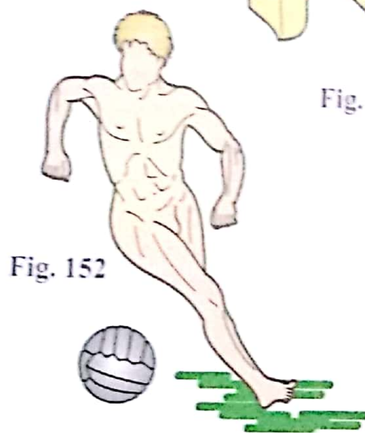


Fig. 152

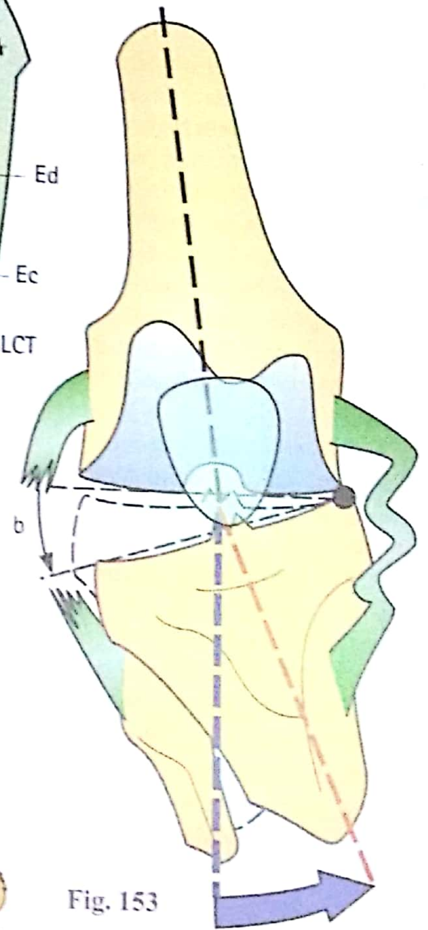


Fig. 153



Fig. 150

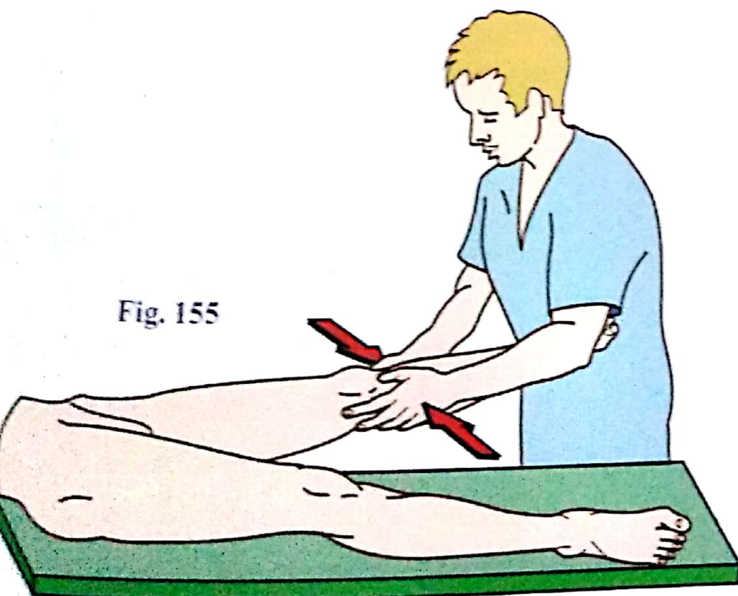


Fig. 155

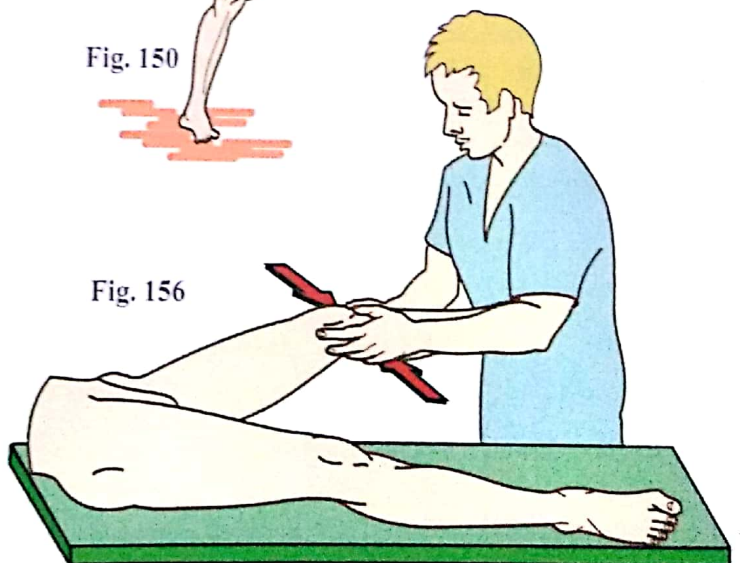


Fig. 156

Stabilité antéro-postérieure du genou

La stabilisation du genou est totalement différente suivant qu'il se trouve en très légère flexion ou en hyperextension.

En rectitude avec très légère flexion (Fig. 157), la force représentant le poids du corps passe en arrière de l'axe de flexion-extension du genou et la flexion a tendance à s'accentuer d'elle-même si la contraction statique du quadriceps (**flèche rouge**) n'intervient pas ; *dans cette position, le quadriceps est donc indispensable à la station debout*.

Par contre, si **le genou passe en hyperextension (Fig. 158)**, la tendance naturelle à l'exagération de cette hyperextension est rapidement bloquée par les éléments capsulo-ligamentaires postérieurs (**en vert**), et la station debout peut être maintenue *sans l'intervention du quadriceps* : c'est le **verrouillage**. Ceci explique que lors des paralysies du quadriceps, on soit amené à accentuer le genu recurvatum pour permettre au malade de se tenir debout et même de marcher.

Lorsque le genou est en hyperextension (Fig. 159), l'axe de la cuisse est oblique en bas et en arrière, et la force **f** ainsi développée peut se décomposer en un vecteur vertical **v** qui transmet le poids du corps vers le squelette jambier, et un vecteur horizontal **h**, dirigé vers l'arrière et qui tend à accentuer l'hyperextension ; plus la force **f** est oblique vers l'arrière, plus ce vecteur **h** est important et *plus les éléments du plan fibreux postérieur sont sollicités* ; un genu recurvatum trop marqué finit par distendre les ligaments et s'aggrave lui-même.

Bien que n'étant pas due à une butée rigide, comme l'olécrane au coude, la limitation de l'hyperextension du genou n'en est pas moins **extrêmement efficace (Fig. 160)**, comme le prouve cette figure acrobatique où tout le poids de la partenaire tend à disloquer son genou droit, qui résiste cependant.

Ce blocage de l'hyperextension dépend d'**éléments capsulo-ligamentaires** pour l'essentiel, et accessoirement d'**éléments musculaires**.

Les éléments capsulo-ligamentaires comprennent les ligaments collatéraux et le ligament croisé postérieur **(Fig. 162)**.

La **partie postérieure de la capsule articulaire (Fig. 161)** est renforcée par de puissants éléments fibreux. De chaque côté, en regard des condyles, un épaississement de la capsule forme les **coques condyliennes 1**, sur la face postérieure desquelles s'insèrent des fibres des muscles jumeaux.

Du coté externe, partant de la styloïde fibulaire s'épanouit un éventail fibreux, le **ligament poplité arqué**, où l'on distingue deux faisceaux :

- le *faisceau externe*, ou ligament latéral externe court de Valois, dont les fibres se terminent sur la coque condylienne externe **2** et l'os sésamoïde du jumeau externe, ou *fabella* **3**, contenu dans cette coque ;
- le *faisceau interne*, qui s'épanouit en éventail vers le dedans, et dont les fibres les plus basses **4** forment le **ligament poplité arqué,** arcade sous laquelle s'engage le *muscle poplité* (flèche rouge) pour pénétrer dans l'articulation ; l'arcade du muscle poplité constitue ainsi la bordure supérieure de l'orifice de pénétration de ce muscle à travers la capsule.

Du côté interne, le plan fibreux capsulaire est renforcé par le **ligament poplité oblique 5**, constitué par le faisceau récurrent détaché du bord externe du tendon du muscle semi-membraneux **6** ; se dirigeant en haut et en dehors, ce ligament poplité oblique se termine sur la coque condylienne externe et la fabella.

Toutes les formations du plan fibreux postérieur se tendent lors de l'hyperextension **(Fig. 162)** en particulier les **coques condyliennes 1**. Nous avons vu précédemment que l'extension tend le ligament collatéral fibulaire **7** et le ligament collatéral tibial **8** (vu en transparence). Le ligament croisé postérieur **9** se tend aussi lors de l'extension, car il est facile de constater que *les insertions supérieures* **A, B, C** de ces éléments se portent en avant autour du centre **O**, lors de l'hyperextension. Cependant, les travaux récents ont montré que c'est le ligament croisé antéro-externe (non figuré ici) qui est le plus tendu dans cette position.

Enfin, **les fléchisseurs (Fig. 163)** sont des facteurs actifs de limitation ; ce sont les **muscles de la patte d'oie** : le gracile **10**, le semi-tendineux **13** et le semi-membraneux **14**, qui passent en arrière du condyle interne, le biceps **11** et aussi les muscles gastrocnémiens **12** dans la mesure où ils sont tendus par la flexion de la tibio-tarsienne.

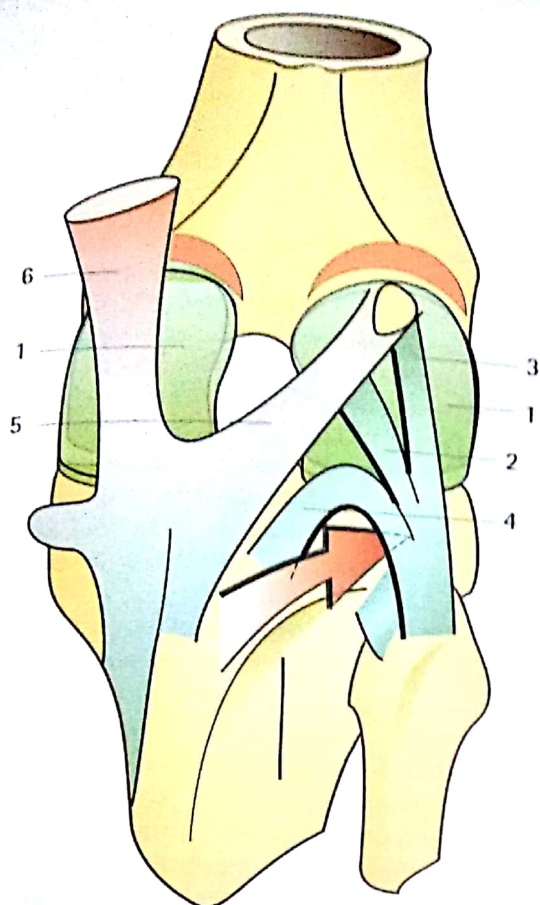


Fig. 161

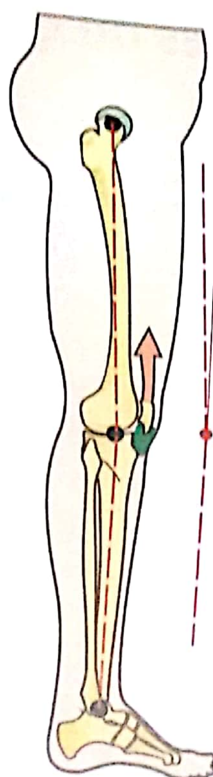


Fig. 157

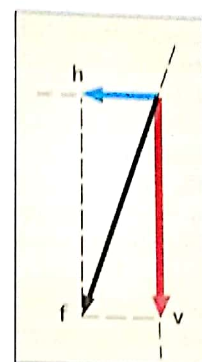


Fig. 159

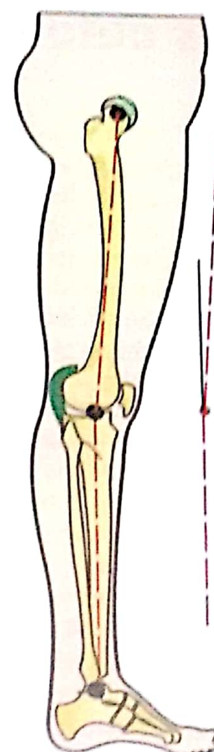


Fig. 158

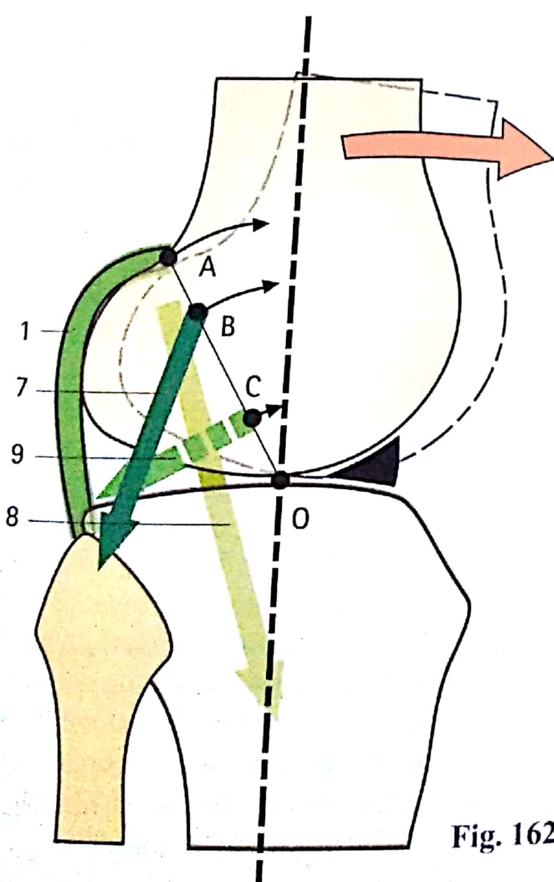


Fig. 162

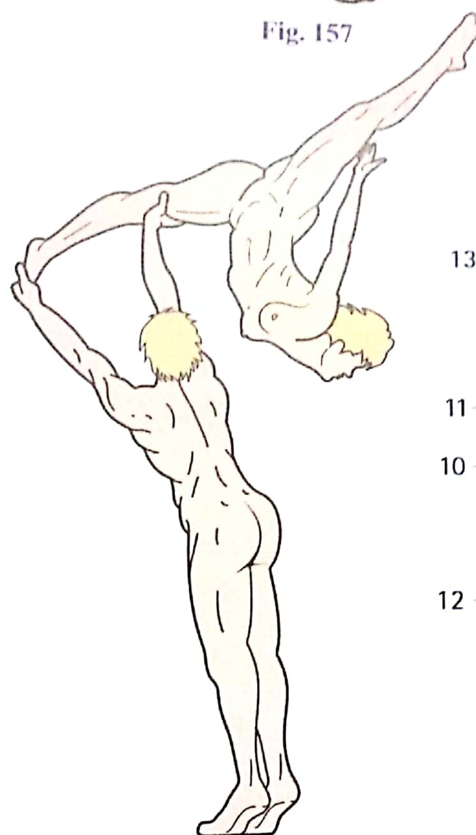


Fig. 160

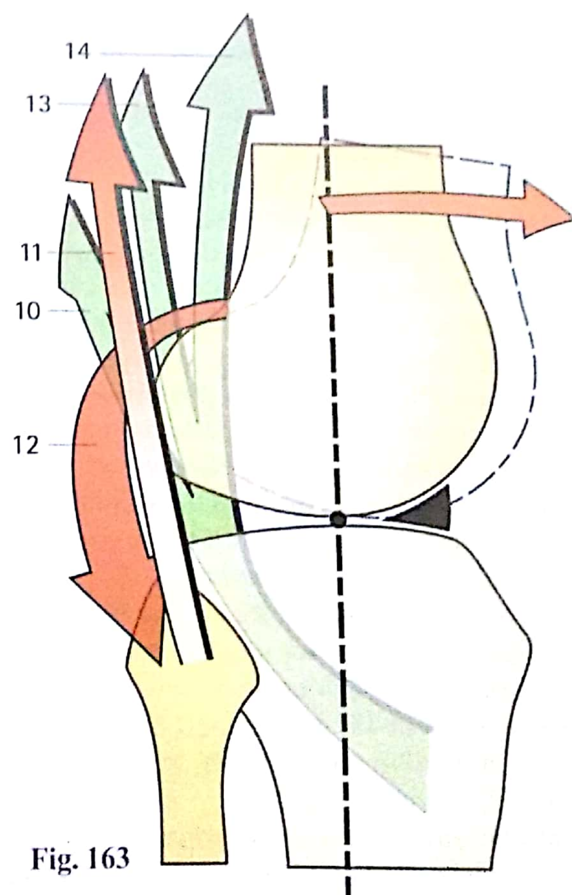


Fig. 163

Les défenses périphériques du genou

Les différentes structures capsulo-ligamentaires s'organisent en un ensemble structuré et cohérent qui constitue les défenses périphériques du genou (**Fig. 164**).

Sur cette coupe transversale du genou à la hauteur de l'interligne, on reconnaît, sur le plateau tibial

- l'insertion de la capsule **1** ;
- en dedans, la **glène interne 2**, avec le tubercule intercondylaire médial **3**, la corne antérieure **4** et la corne postérieure **5 du ménisque interne** ;
- en dehors, la **glène externe 6**, avec le tubercule intercondylaire latéral **7**, le **ménisque externe 8** et **9**, relié en avant à l'interne par le **ligament jugal 10** ;
- en avant, la **patella 11**, surplombant la **tubérosité antérieure du genou 12**, et reliée aux ménisques par les **ailerons ménisco-rotuliens interne 13** et **externe 14**, et l'insertion antérieure du **ligament croisé antérieur 15**, avec une **expansion 16** à la corne antérieure du ménisque interne ;
- en arrière, l'insertion postérieure du **ligament croisé postérieur 17**, avec le faisceau ménisco-fémoral **18** (de Wrisberg).

Les défenses périphériques du genou sont assumées par **trois formations principales** : le ligament collatéral tibial, le ligament collatéral fibulaire et le plan capsulo-fibreux postérieur :

- le **ligament collatéral tibial 19** présente, selon F. Bonnel, une contrainte à la rupture de 115 kg/cm^2 et une déformation à la rupture de 12,5 % ;
- le **ligament collatéral fibulaire 20** présente une contrainte de rupture de 276 kg/cm^2 et une déformation à la rupture de 19 %. Il est donc à la fois plus résistant et plus élastique que le ligament collatéral tibial ;
- le **plan capsulo-fibreux postérieur** est constitué par la coque condylienne interne **21**, la coque condylienne externe **22** avec son sésamoïde ou fabella **23**, et des renforcements : le ligament poplité oblique **24** et le ligament poplité arqué **25**.

Les **formations accessoires** constituent quatre nappes fibro-tendineuses d'inégale résistance et d'inégale importance.

- La **nappe fibrotendineuse postéro-interne** est la plus importante. F. Bonnel l'appelle noyau fibro-tendineux. G. Bousquet parle de point d'angle postéro-interne, en abrégé **PAPI**, concept plus chirurgical qu'anatomique. Cette nappe fibrotendineuse postéro-interne, située en arrière du ligament collatéral tibial, est constituée par :

– les fibres les plus postérieures du LLI **26** ;
– le bord interne de la coque condylienne interne **27** ;
– deux expansions du tendon du muscle semi-membraneux **28**, le **faisceau réfléchi 29**, qui parcourt la marge infraglénoïdale interne et l'**expansion méniscale 30**, qui se fixe sur la périphérie postérieure du ménisque interne.

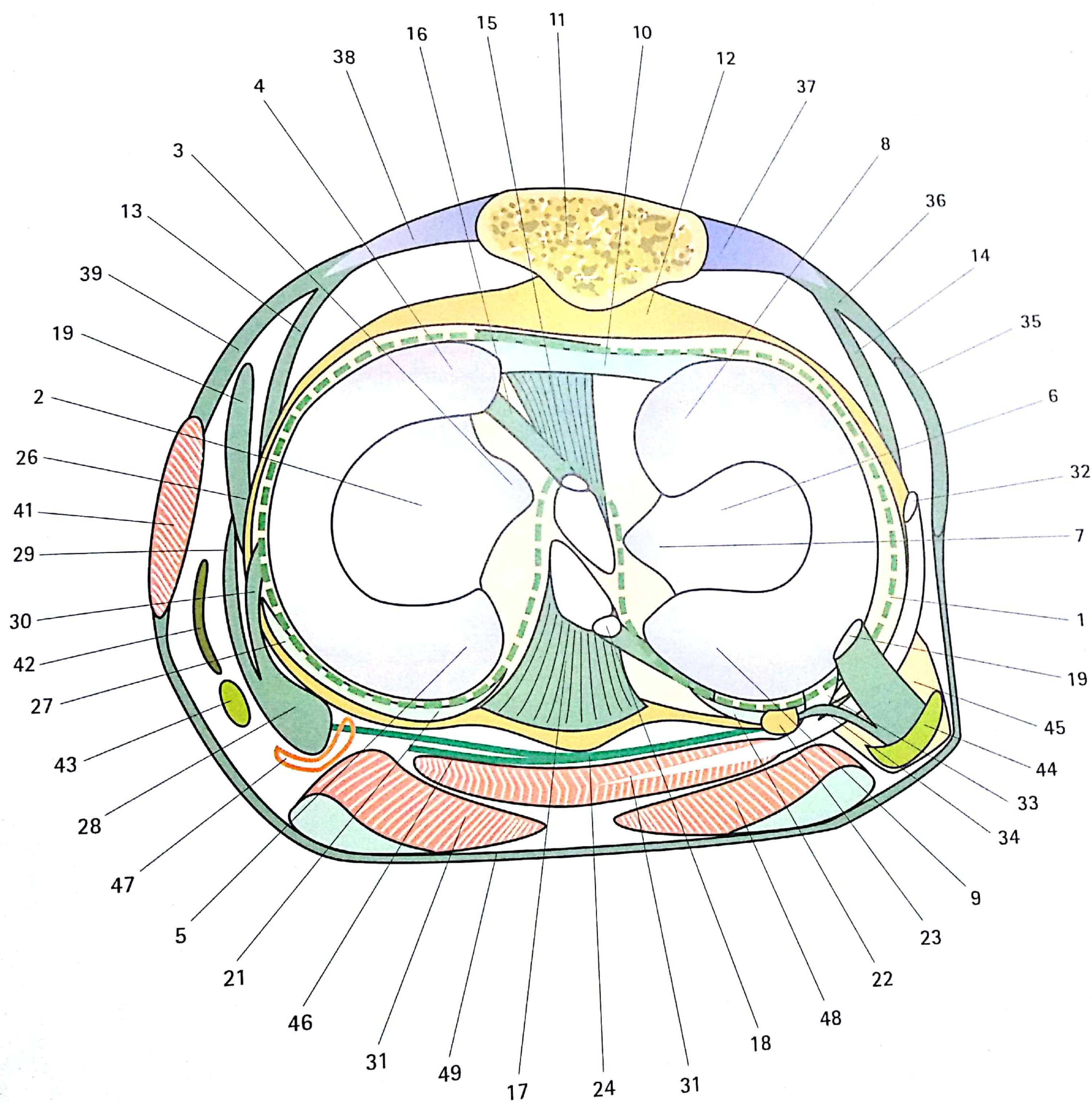
- La **nappe fibrotendineuse postéro-externe**, ou **PAPE**, nettement moins puissante que l'interne, puisque le ménisque externe, à ce niveau, est séparé de la capsule et du ligament collatéral fibulaire par le passage du tendon du muscle poplité **31** allant se fixer sur le condyle externe **32**. Ce tendon envoie une **expansion méniscale 33** qui amarre la partie postérieure du ménisque externe. Le renfort fibreux est complété par le ligament collatéral fibulaire court **34** et le bord externe de la coque condylienne externe.
- La **nappe fibrotendineuse antéro-externe** ou **PAAE** est formée par le tractus ilio-tibial ou ancienne bandelette de Maissiat **35**, qui envoie une **expansion 36** au bord externe de la patella, et par les expansions directes et croisées du tendon quadricipital **37**.
- La **nappe fibrotendineuse antéro-interne** ou **PAAI** est constituée par les expansions directes et croisées du tendon quadricipital **38**, renforcées par l'expansion du tendon du muscle artorius **39** qui se fixe au bord interne de la patella.

Les **muscles périarticulaires** participent aussi aux défenses périphériques du genou : par leur contraction parfaitement synchronisée au cours du schéma moteur et en prévision des contraintes que *le cortex cérébral anticipe*, ils s'opposent aux distorsions articulaires, apportant une aide indispensable aux ligaments. Parmi ces muscles, le plus important est le **muscle quadriceps**, sans lequel aucune stabilité du genou n'est possible ; par sa puissance et son exacte coordination, il est même capable, dans une certaine mesure, de compenser des défaillances ligamentaires. Sa bonne trophicité est donc un élément indispensable à la réussite de toute intervention chirurgicale. Quand on sait combien il est prompt à s'atrophier et difficile à récupérer, il mérite une grande considération de la part des chirurgiens et des kinésithérapeutes.

Du côté externe, le tractus ilio-tibial ou ancienne bandelette de Maissiat **35** doit être considérée comme le tendon terminal du muscle deltoïde fessier. Du côté postéro-interne se situent le muscle semi-membraneux **40** et les muscles de la patte d'oie : les muscles sartorius **41**, gracile **42** et semi-tendineux **43**.

Du côté postéro-externe, se trouvent deux muscles : le muscle poplité **31**, à la physiologie très particulière envisagée plus loin, et le muscle biceps fémoral **44** dont le fort tendon, fixé sur la tête de la fibula **45**, double le ligament collatéral fibulaire.

Enfin, en arrière, l'espace est occupé par les muscles gastrocnémiens qui se fixent au-dessus et sur les coques condyliennes : le muscle gastrocnémien médial **46** dont la lame tendineuse d'insertion croise en X allongé le tendon du muscle semi-membraneux par l'intermédiaire de la **bourse séreuse** du gastrocnémien médial et du semi-membraneux **47**, communiquant souvent avec la synoviale articulaire ; le gastrocnémien latéral **48** dont la lame tendineuse d'insertion croise de la même façon le tendon du muscle biceps, mais sans interposition de bourse séreuse. Le genou est contenu dans l'**aponévrose d'enveloppe 49**.



16
15
11
10
38
12
4
37
3
8
13
36
14
39
35
19
2
6
26
32
41
7
29
30
1
42
19
27
45
43
44
28
33
34
47
9
5
23
21
22
46
48
18
31
49
17
24
31

Fig. 164

Les ligaments croisés du genou

Lorsqu'on ouvre par-devant l'articulation du genou **(Fig. 165, d'après Rouvière)**, on prend conscience du fait que **les ligaments croisés sont situés en plein centre de l'articulation**, logés en grande partie dans la fosse intercondylaire.

Le **ligament croisé antérieur 1** est le premier qui s'offre à la vue. Son insertion tibiale **12** s'effectue sur la surface préspinale, le long de la glène interne, entre l'insertion de la corne antérieure du ménisque interne **7** en avant, et celle du ménisque externe **8** en arrière (voir aussi Fig. 79 p. 93). Son trajet est oblique en haut en arrière et en dehors et son insertion fémorale **1** s'effectue **(Fig. 167, d'après Rouvière)** sur la face axiale du condyle externe au niveau d'une zone étroite et allongée verticalement au contact du cartilage, sur la partie la plus postérieure de cette face (voir Fig. 81 et 83 p. 93).

On lui décrit trois faisceaux :

- le **faisceau antéro-interne** : le plus long, celui qui se présente le premier à la vue et le plus exposé aux traumatismes ;
- le **faisceau postéro-externe** : il est masqué par le précédent et c'est lui qui résiste dans les ruptures partielles ;
- le **faisceau intermédiaire**.

Dans son ensemble, sa forme est *tordue sur elle-même*, car ses fibres les plus antérieures sur le tibia ont les insertions les plus basses et les plus antérieures sur le fémur, et ses fibres les plus postérieures sur le tibia s'insèrent le plus haut sur le fémur, si bien que *toutes ses fibres n'ont pas la même longueur*. D'après F. Bonnel, la longueur moyenne des fibres du ligament croisé antérieur est comprise entre 1,85 et 3,35 cm ; il y a donc une grande différence de longueur des fibres suivant leur situation.

Le **ligament croisé postérieur 2** se situe dans le fond de la fosse intercondylaire, *derrière le ligament croisé antérieur* **(Fig. 165)**. Son insertion tibiale **6** s'effectue **(Fig. 166)** sur la partie la plus reculée de la surface rétrospinale ; elle déborde même **(Fig. 167 et 168, d'après Rouvière)** sur le pourtour postérieur du plateau tibial (voir aussi Fig. 79 p. 99). Cette insertion tibiale du ligament croisé postérieur est donc située *bien en arrière* **(Fig. 166)** de l'insertion de la corne postérieure du ménisque externe **9** et de celle du ménisque interne **10**. Le trajet du ligament croisé postérieur est oblique en avant, en dedans et en haut **(Fig. 168, genou fléchi à 90°)**. Son *insertion fémorale* **2** occupe le fond de la fosse intercondylaire **(Fig. 169, d'après Rouvière)** et déborde même notablement **(Fig. 168)** sur la face axiale du condyle interne, le long du cartilage, à la limite inférieure de cette face sur une zone d'insertion allongée horizontalement (voir aussi Fig. 79 p. 93).

On lui décrit trois faisceaux :

- le **faisceau postéro-externe** : le plus postérieur sur le tibia et le plus externe sur le fémur ;
- le **faisceau antéro-interne** : le plus antérieur sur le tibia et le plus interne sur le fémur ;
- le **ligament ménisco-fémoral 3**, qui s'attache à la corne postérieure du ménisque externe **(Fig. 166 et 167)**, s'accole ensuite rapidement au corps du ligament **2** qu'il accompagne généralement sur sa face antérieure **(Fig. 165)**, pour venir se fixer avec lui sur la face axiale du condyle interne. Il existe parfois un équivalent de cette disposition pour le ménisque interne **(Fig. 166)** : quelques fibres **5** du ligament croisé antérieur viennent se fixer sur la corne antérieure du ménisque interne, près de l'insertion du ligament transverse **11**.

Les ligaments croisés sont en contact l'un avec l'autre **(Fig. 169 : les croisés ont été coupés près de leur insertion fémorale)** par leur bord axial, le ligament antérieur **1** passant en dehors du ligament postérieur **2**. Ils ne sont pas libres à l'intérieur de la cavité articulaire, mais recouverts par la **synoviale 4** et ils contractent avec la capsule d'importants rapports que nous allons étudier à la page suivante. Ils glissent l'un contre l'autre par leur bord axial lors des mouvements du genou.



Fig. 165



Fig. 167

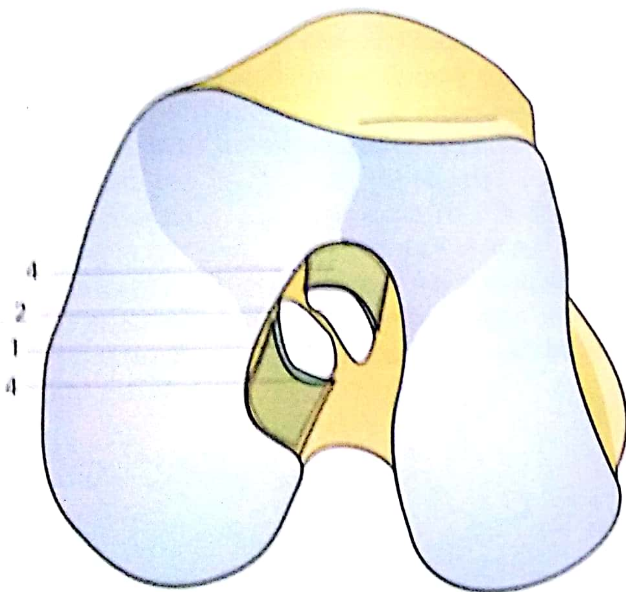


Fig. 169

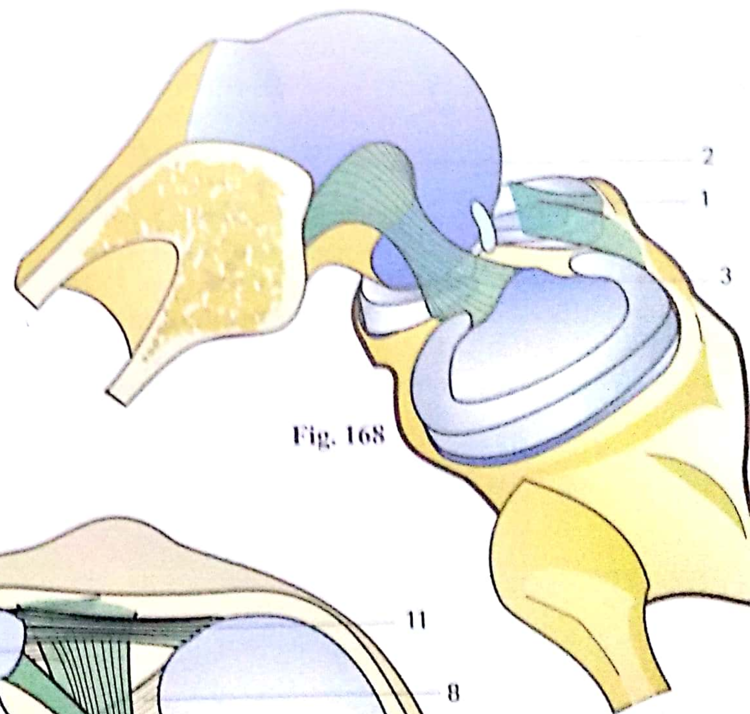


Fig. 168

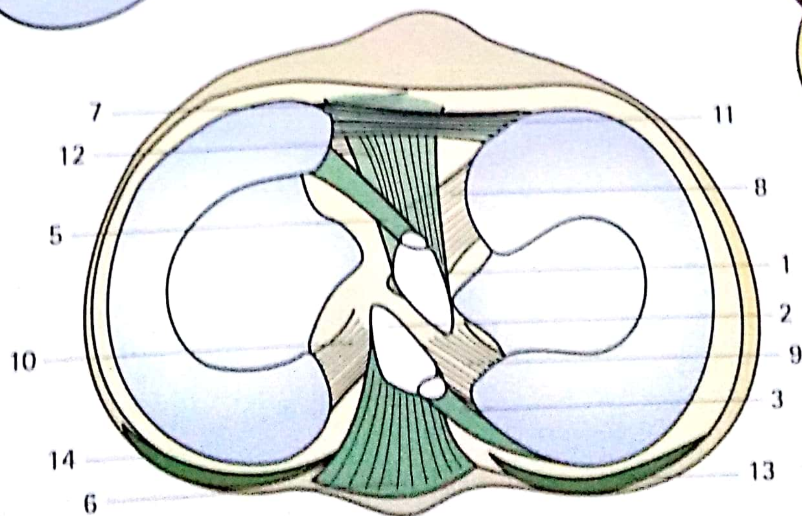


Fig. 166

Rapports de la capsule et des ligaments croisés

Les ligaments croisés contractent des rapports tellement intimes avec la capsule articulaire qu'on peut dire qu'ils ne sont en réalité que des épaississements de cette capsule et que, comme tels, ils en font partie intégrante. Nous avons vu (Fig. 78 p. 93) comment la capsule pénètre dans la fosse intercondylaire pour former une double cloison dans l'axe de l'articulation. C'est par commodité que nous avons dit, en première approximation, que l'insertion tibiale de la capsule laissait en dehors de l'articulation les insertions des ligaments croisés ; en réalité, **l'insertion capsulaire passe par l'insertion des ligaments croisés**. Mais, simplement, l'épaississement capsulaire des ligaments croisés « déborde » sur la face extérieure de la capsule, donc à l'intérieur de la double cloison.

Sur une **vue postéro-interne (Fig. 171)**, après avoir enlevé le condyle interne et découpé en partie la capsule, le **ligament croisé antérieur** apparaît nettement « plaqué » contre le feuillet externe de la cloison capsulaire (le ligament croisé postérieur n'a pas été dessiné). On remarquera, en avant, le cul-de-sac subquadricipital et l'orifice dans lequel vient se sertir la patella.

Sur une **vue postéro-externe (Fig. 172)**, préparée de la même manière, le **ligament croisé postérieur** apparaît « plaqué » contre le feuillet interne de la cloison capsulaire.

On notera que toutes les fibres des ligaments croisés n'ont pas la même longueur ni la même orientation : au cours des mouvements elles ne sont donc pas toutes tendues simultanément (voir p. 124).

Ces schémas permettent en outre de mettre en évidence les **coques condyliennes**, en partie réséquées au niveau du condyle externe **(Fig. 171)** et au niveau du condyle interne **(Fig. 172)**.

Sur une **coupe vertico-frontale (Fig. 170)** passant par la partie postérieure des condyles, on peut noter le « compartimentage » de la cavité articulaire (fémur et tibia ont été artificiellement écartés) :

- au milieu, la **cloison capsulaire**, doublée des ligaments croisés, et séparant la cavité en deux moitiés externe et interne ; cette cloison est prolongée en avant par le paquet adipeux (voir p. 94) ;
- *chacune des deux moitiés* de l'articulation est séparée à son tour par les ménisques en *deux étages*, l'étage supérieur ou supraméniscal, correspondant à l'interligne fémoro-méniscal, et l'étage inférieur ou inframéniscal, correspondant à l'interligne tibio-méniscal.

C'est la présence des ligaments croisés qui modifie si profondément la structure de cette articulation trochléaire. En effet, si les deux condyles étaient réunis, ils formeraient une trochlée... Si bien que l'appeler bicondylaire n'a aucun sens sur le plan mécanique. Le ligament croisé antérieur **(Fig. 173)** à partir de sa position moyenne de départ **1**, commence d'abord par se coucher à l'horizontale **2** sur le plan du plateau tibial lors de la flexion à 45-50°, puis il remonte jusqu'à sa position la plus élevée **3** pour la flexion extrême. Lorsqu'il s'abaisse, il se loge dans l'incisure de l'éminence intercondylienne, comme s'il avait « scié » le massif des tubercules intercondylaires, à la manière de l'ancien couteau à pain des boulangers **(Fig. 174 : dessin évocateur d'un couteau à pain de boulanger*, séparant les deux tubercules intercondylaires)**. Le ligament croisé postérieur **(Fig. 175)** au cours de son mouvement de l'extension **A** à la flexion extrême **B** « balaye » un secteur bien plus important – de près de 60° – que le ligament croisé antérieur et par rapport au fémur, il « découpe » par son mouvement, la fosse intercondylaire, ce qui « sépare » ainsi les deux joues de la trochlée physiologique et théorique constituée par les deux condyles.

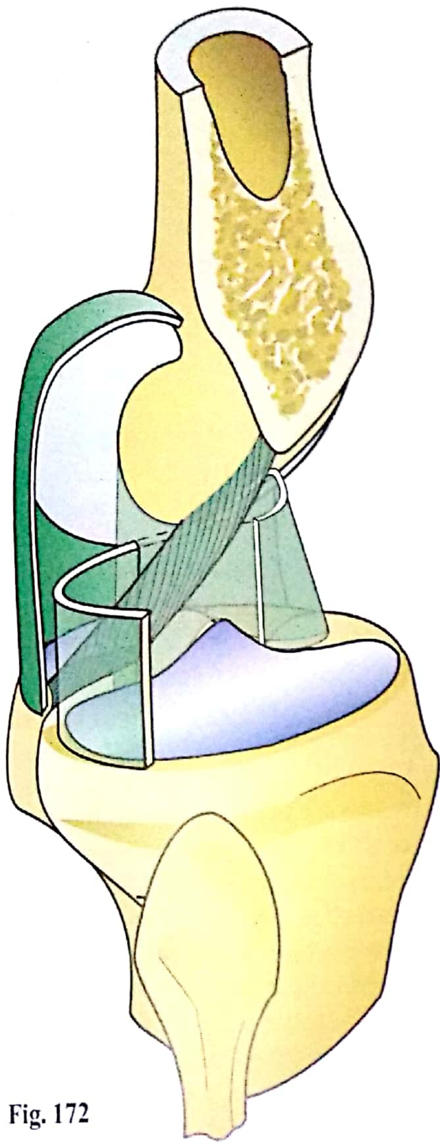


Fig. 172

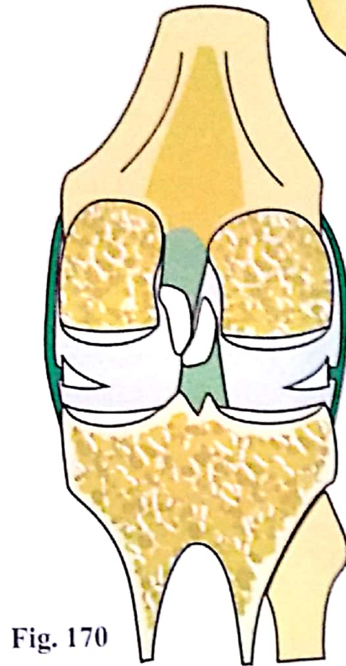


Fig. 170

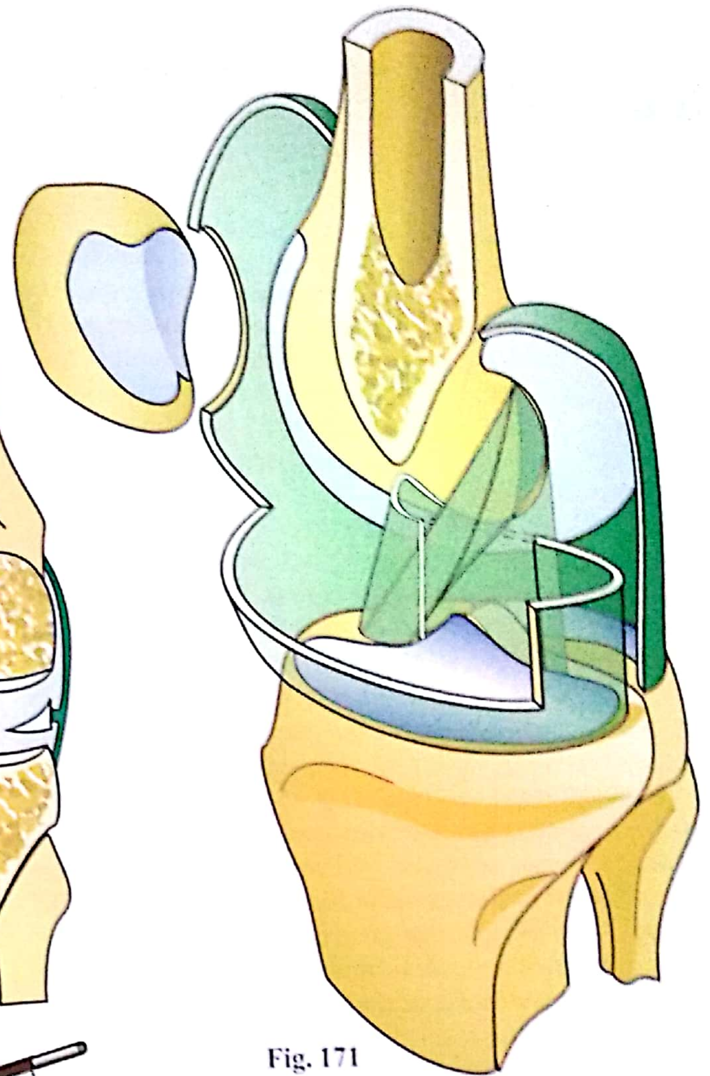


Fig. 171

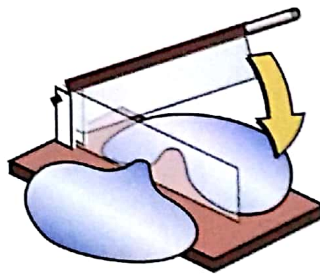


Fig. 174

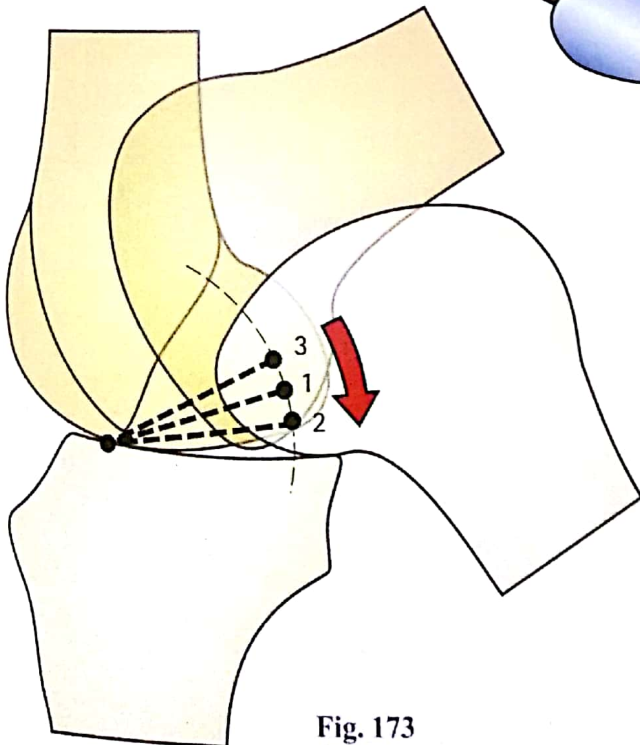


Fig. 173

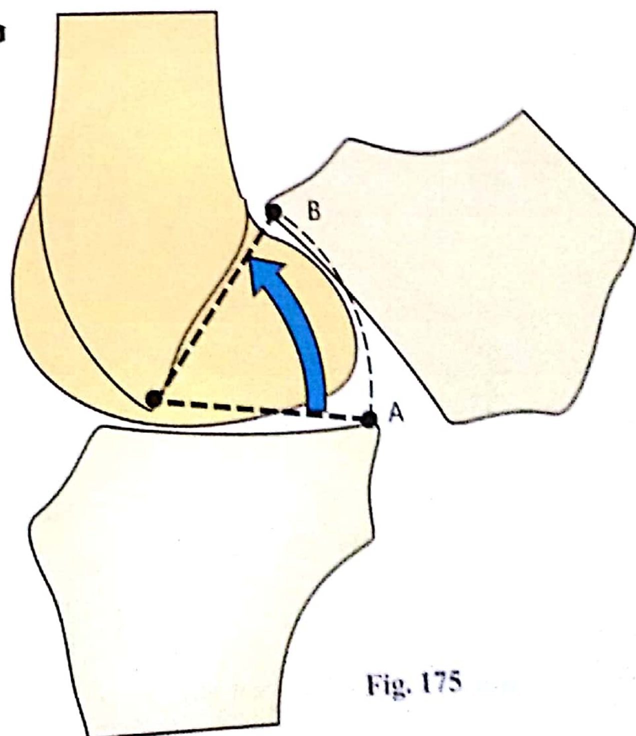


Fig. 175

Direction des ligaments croisés

Les ligaments croisés, vus en perspective postéro-interne **(Fig. 176 : les ligaments ont été étirés)**, apparaissent effectivement comme étant **croisés dans l'espace** l'un par rapport à l'autre. Dans le **plan sagittal (Fig. 177 : vue interne du condyle externe)**, leur disposition croisée est évidente : le ligament croisé antérieur (externe) **AE** est oblique en haut et en arrière tandis que le ligament croisé postérieur (interne) **PI** est oblique en haut et en avant. Si l'on isole les ligaments croisés, on constate qu'ils restent croisés aussi bien dans l'extension **(Fig. 178)** que dans la flexion ! **(Fig. 179)**. On constate aussi que lors des mouvements, ils glissent l'un contre l'autre par leur face axiale. Leurs directions sont aussi **croisées dans le plan frontal (Fig. 180 : vue postérieure)** car leurs insertions tibiales **(points noirs)** sont alignées dans l'axe antéro-postérieur **(flèche S)**, alors que leurs insertions fémorales sont distantes de 1,7 cm il s'ensuit que le ligament croisé postérieur est *oblique en haut et en dedans* et que le ligament croisé antérieur est *oblique en haut et en dehors*. Dans le plan horizontal (voir Fig. 131 p. 205) par contre, ils sont parallèles et en contact par leur bord axial.

Les ligaments croisés sont non seulement croisés entre eux, mais ils sont **aussi croisés avec le ligament latéral du côté homologue**. Ainsi le ligament croisé antérieur LCAE est-il croisé avec le ligament collatéral fibulaire LLE **(Fig. 181 : vue externe)** et le ligament croisé postérieur LCPI avec le ligament collatéral tibial LLI **(Fig. 182 : vue interne)**. Il existe donc une *alternance régulière* dans l'obliquité des quatre ligaments lorsqu'on les prend dans l'ordre de dehors en dedans ou vice versa **(Fig. 183 : vue schématique des quatre ligaments par rapport au plateau tibial)**.

Il y a aussi une **différence d'inclinaison entre les deux ligaments croisés** : en position d'*extension du genou* **(Fig. 177)**, le ligament croisé antérieur **AE** est *plus vertical*, alors que le ligament croisé postérieur **PI** est *plus horizontal* ; il en est de même pour la direction générale des zones d'insertion fémorales (vues en transparence) : celle du ligament croisé postérieur est horizontale **b**, celle du ligament croisé postérieur est verticale **a**. Un moyen mnémotechnique rappelle ce fait grâce à l'adage classique : « l'externe est debout quand l'interne est couché ».

Sur le *genou fléchi* **(Fig. 184 : vue interne du condyle externe)**, le ligament croisé postérieur LCPI, qui était couché horizontalement en extension, se relève verticalement **(Fig. 179)**, décrivant un arc de cercle de plus de 60° par rapport au tibia, alors que le ligament croisé antérieur AE ne se redresse que très peu **(flèche bleue)**.

Le **rapport de longueur entre les croisés** est variable suivant les individus, mais, avec les distances des points d'insertion tibiaux et fémoraux, il constitue la **caractéristique propre à chaque genou**, car c'est entre autres lui qui détermine, comme nous l'avons vu précédemment, le profil des condyles.

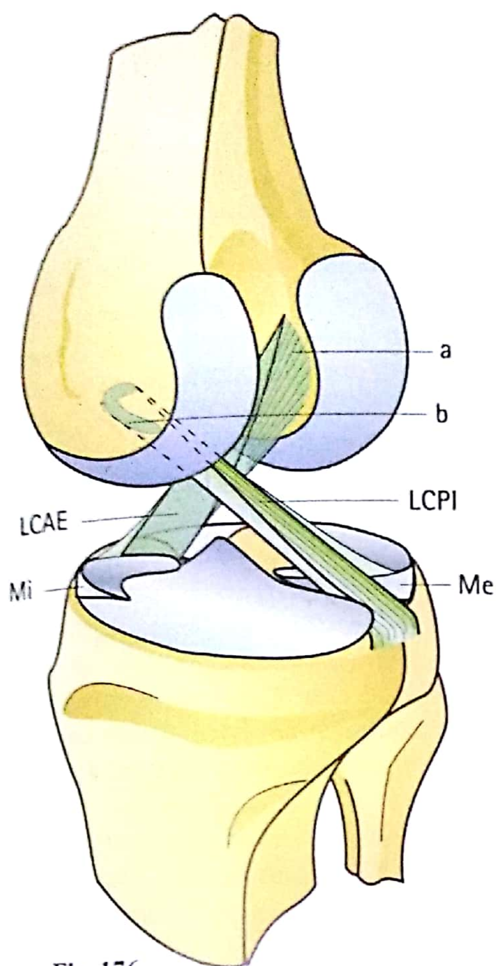


Fig. 176

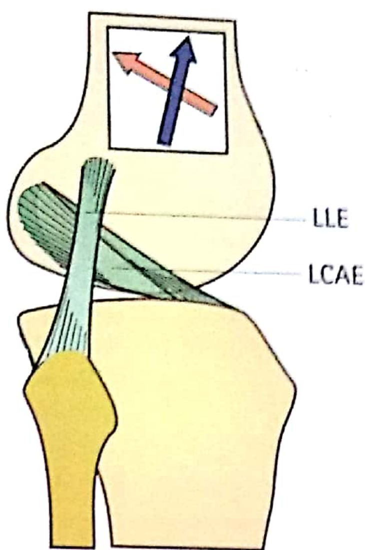


Fig. 181

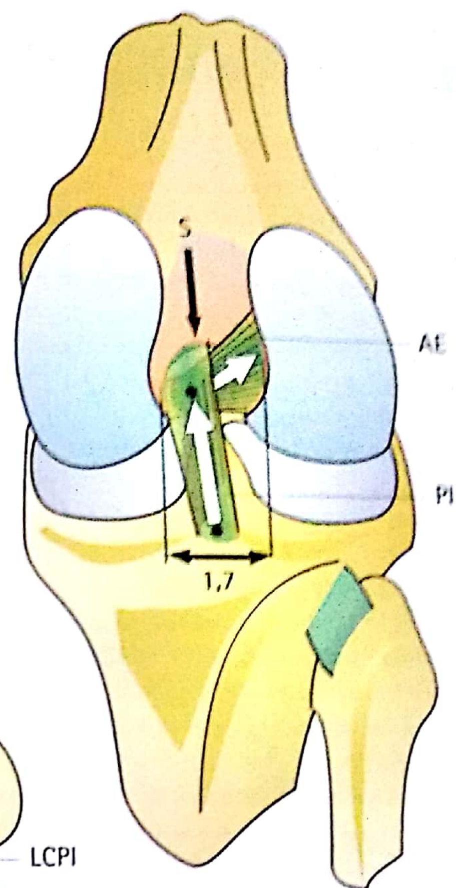


Fig. 180

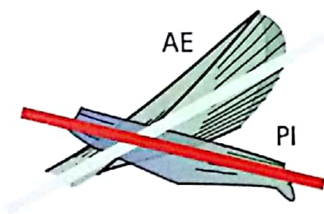


Fig. 178

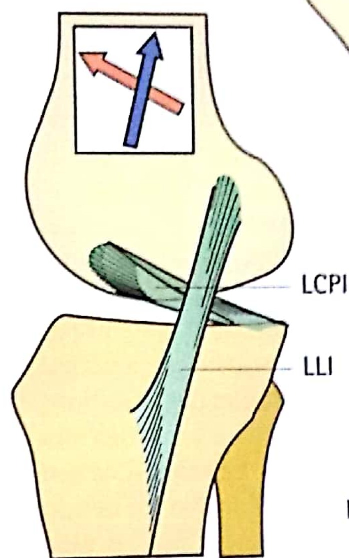


Fig. 182

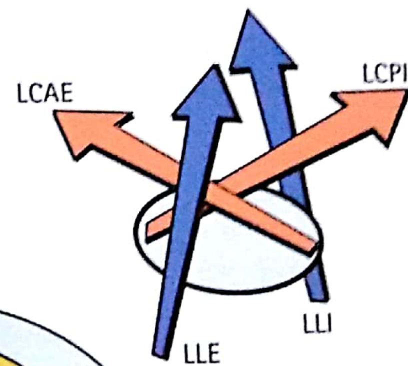


Fig. 183

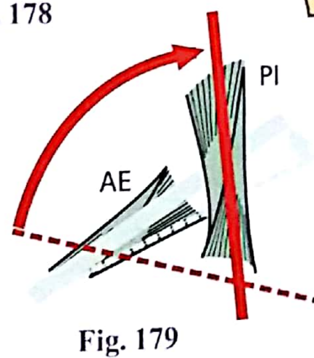


Fig. 179

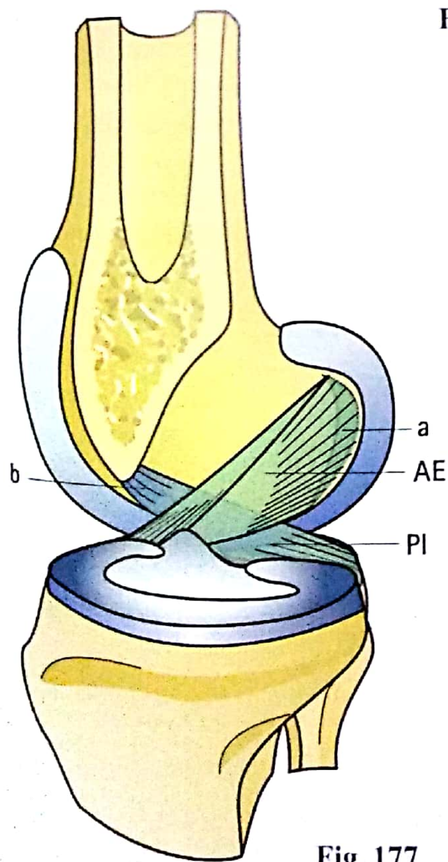


Fig. 177

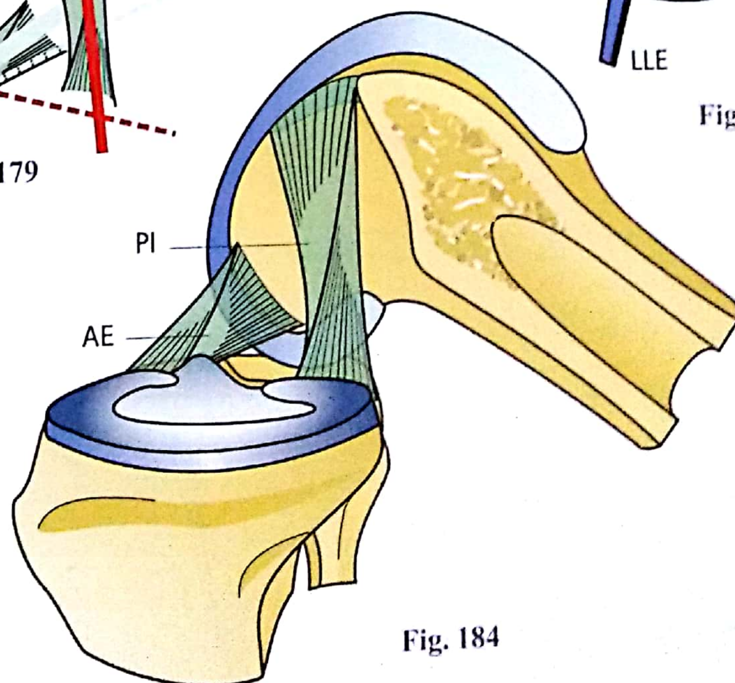


Fig. 184

Rôle mécanique des ligaments croisés

On considère habituellement les ligaments croisés comme des cordes, fixées sur des insertions quasi punctiformes. Cette première approximation a l'avantage de mettre en lumière l'action générale d'un ligament, mais ne permet en aucun cas de connaître ses réactions fines. Pour cela, il faut prendre en compte trois facteurs.

- **L'épaisseur du ligament**

L'épaisseur et le volume du ligament sont directement proportionnels à sa résistance et inversement proportionnels à ses possibilités d'allongement, chaque fibre pouvant être considérée comme un ressort élémentaire de faible élasticité.

- **La structure du ligament**

Du fait de l'étendue des insertions, *les fibres n'ont pas toutes la même longueur*. Conséquence importante, chaque fibre n'est pas sollicitée au même moment. Comme pour les fibres musculaires, il s'agit d'un véritable recrutement des fibres au cours même du mouvement, ce qui fait varier sa résistance et son élasticité.

- **L'étendue et la direction de ses insertions**

Par ailleurs, les fibres ne sont pas toujours parallèles entre elles, elles s'organisent souvent suivant des plans tordus sur eux-mêmes, « gauchis », car les lignes d'insertion ne sont pas parallèles entre elles mais plus souvent obliques ou perpendiculaires dans l'espace. De plus, la direction relative des insertions varie au cours du mouvement, ce qui contribue au « recrutement » différentiel ; en outre, cela modifie la direction d'action du ligament, pris globalement. Cette variation dans l'action directrice du ligament ne s'effectue, pas seulement dans un plan sagittal, mais aussi *dans les trois plans de l'espace*, ce qui rend parfaitement compte de leurs **actions complexes et simultanées sur la stabilité antéro-postérieure, latérale et rotatoire**.

Ainsi la géométrie des ligaments croisés détermine, comme démontré précédemment, le *profil condylo-trochléaire* dans le plan sagittal, ainsi que dans les deux autres plans de l'espace.

Globalement, les ligaments croisés assurent la **stabilité antéro-postérieure** du genou et permettent les **mouvements de charnière** tout en maintenant les surfaces articulaires en contact.

Leur rôle peut être illustré par un **modèle mécanique (Fig. 185 : modèle vue par la tranche)** facile à réaliser (voir en fin d'ouvrage) à l'aide de deux planchettes ou deux cartons épais A et B reliés entre eux par des rubans **ab** et **cd** tendus d'un bord de l'un au bord opposé de l'autre ; elles peuvent ainsi basculer l'une par rapport à l'autre autour de deux charnières : la charnière **a** est confondue avec **c** et la charnière **b** l'est avec **d**, mais il leur est *impossible de glisser l'un sur l'autre*.

Les ligaments croisés du genou réalisent un montage et un fonctionnement semblable, à la différence qu'il n'y a pas seulement deux points charnières, mais toute une série alignés sur la courbe du condyle. Comme avec le modèle, **le glissement antéropostérieur est impossible**.

Pour la suite de la démonstration, les ligaments sont figurés de façon linéaire : le ligament croisé antérieur est le segment ab, le ligament croisé postérieur est **cd** sur les figures 186 et 188. Sur les figures 187 et 189, sont indiquées les fibres extrêmes et moyennes, ainsi que les zones d'insertion.

Partant de la position de rectitude **(Fig. 186)**, ou de flexion faible à 30° **(Fig. 187)** pour laquelle les ligaments croisés sont également tendus, la flexion fait *basculer la base fémorale* cb **(Fig. 188)** alors que le ligament croisé postérieur **cd** *se redresse* et que ligament croisé antérieur **ab** *devient horizontal*. Sur le schéma plus complet **(Fig. 189)**, en flexion à 60°, on voit le déplacement vers le haut de la zone d'insertion fémorale du ligament croisé postérieur **(en rouge)** et vers le bas de la zone d'insertion fémorale du ligament croisé antérieur **(en vert)**. Une étude précise reste à faire sur la mise en tension successive des fibres élémentaires de chacun des ligaments croisés au cours du mouvement, car il est évident qu'elles ne subissent pas la même tension suivant leur position au sein du ligament **(Fig. 190 : diagramme des fibres du ligament croisé postérieur)**.

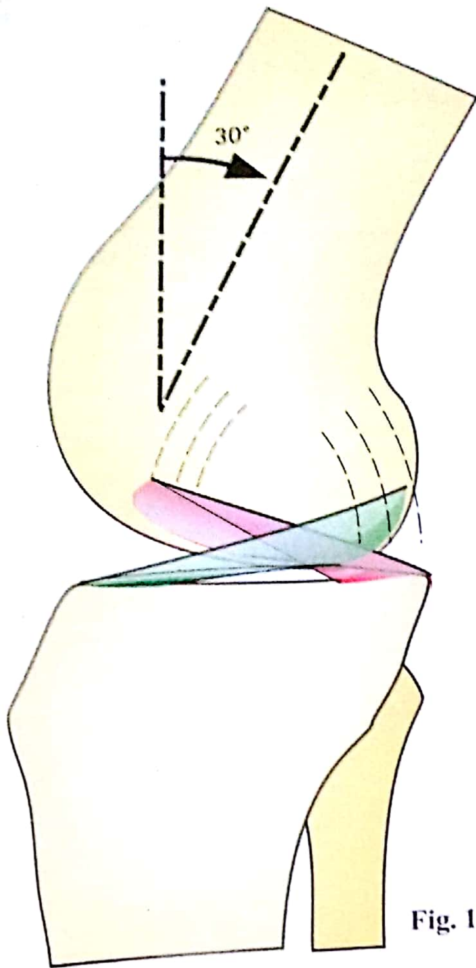


Fig. 187

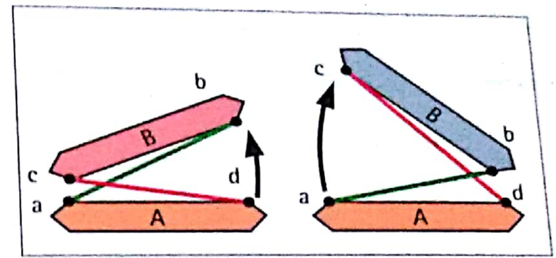


Fig. 185

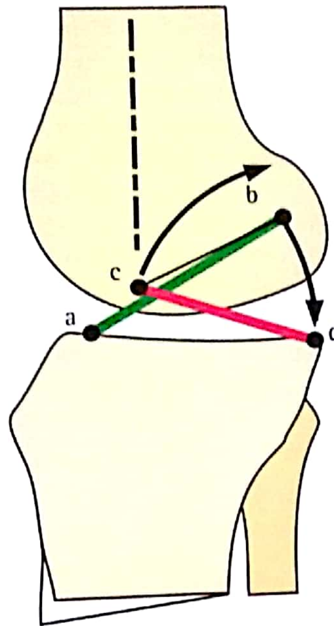


Fig. 186

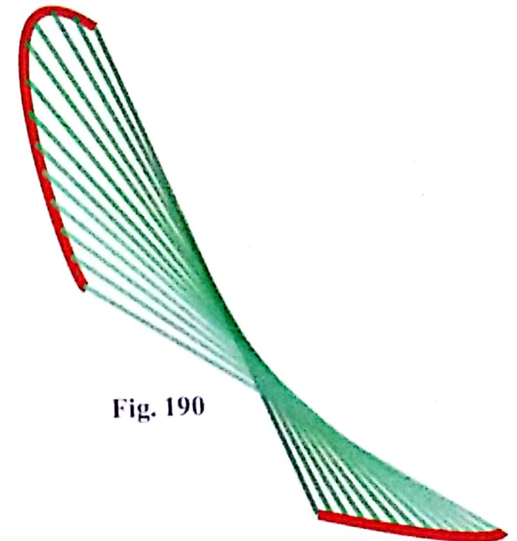


Fig. 190

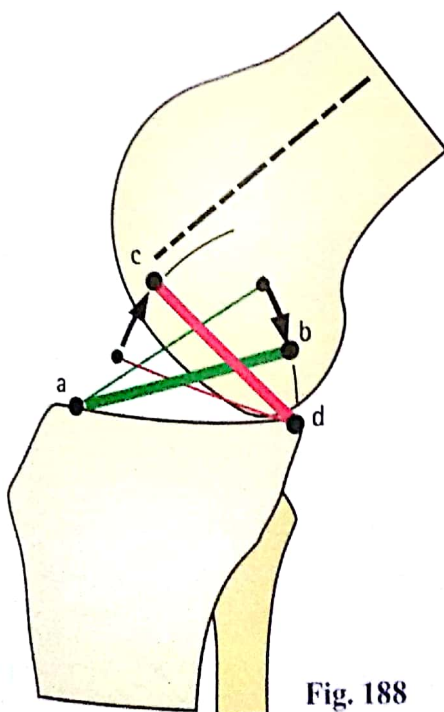


Fig. 188

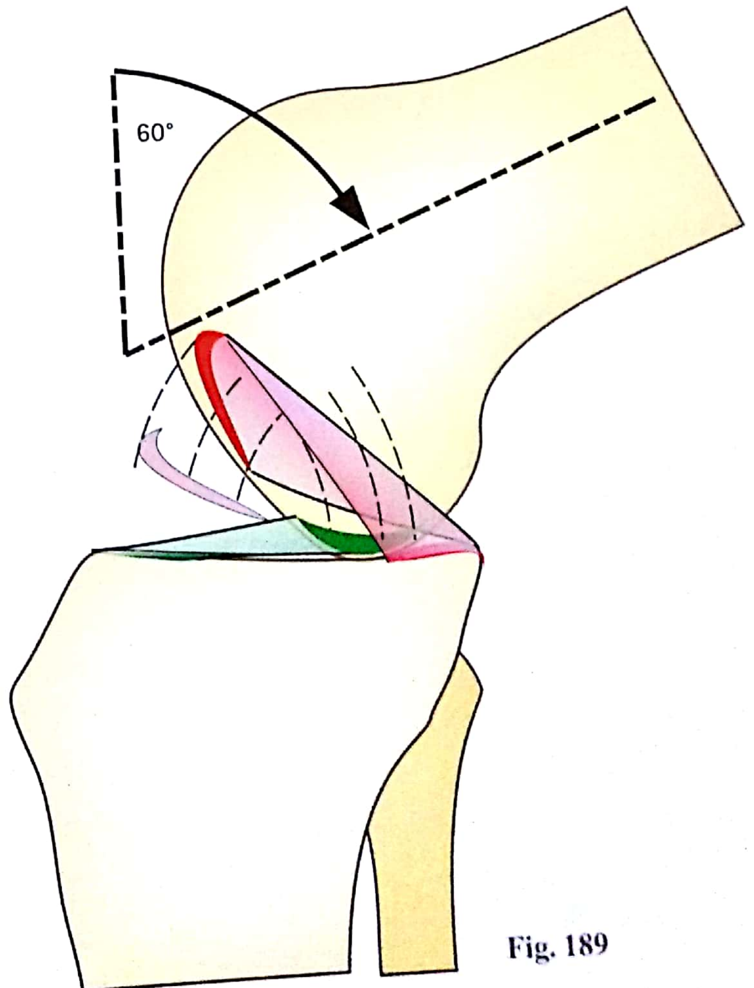


Fig. 189

Rôle mécanique des ligaments croisés *(suite)*

À partir du moment où la **flexion** s'accentue à 90° **(Fig. 191)**, puis à 120° **(Fig. 192)**, le ligament croisé postérieur se dresse verticalement et se tend proportionnellement plus que le ligament croisé antérieur. Sur le schéma détaillé **(Fig. 193)**, il apparaît que les fibres moyennes et inférieures du ligament croisé antérieur sont détendues (−) alors que seules les fibres antéro-supérieures sont tendues (+). Pour le ligament croisé postérieur, par contre, les fibres postéro-supérieures sont peu détendues (−), alors que les fibres antéro-inférieures sont tendues (+). Le ligament croisé postérieur est tendu en flexion.

En **extension** et en **hyperextension (Fig. 194)**, par rapport à la position de départ **(Fig. 195 et 196)**, toutes les fibres du ligament croisé antérieur sont, par contre, tendues (+), alors que seules les fibres postéro-supérieures du ligament croisé postérieur sont tendues (+). En outre, en hyperextension **(Fig. 197)**, le fond de la fosse intercondylaire **c** vient s'appuyer **(petite flèche noire)** sur le ligament croisé antérieur qu'il tend à la manière d'une corde d'arc. Le ligament croisé antérieur est donc tendu en extension et c'est *un des freins de l'hyperextension*.

Les travaux récents de F. Bonnel confirment ainsi ce que pensait Strasser (1917), qui, grâce à un modèle mécanique, avait trouvé que le ligament croisé antérieur est tendu dans l'extension et le ligament croisé postérieur dans la flexion. Cependant, l'analyse plus fine des conditions mécaniques confirme que Roud (1913) était aussi dans le vrai, qui pensait que **les ligaments croisés restent toujours tendus par certaines de leurs fibres**, en raison de leur longueur inégale. Comme souvent en biomécanique, *deux propositions apparemment contradictoires peuvent être vraies simultanément et ne s'excluent pas*.

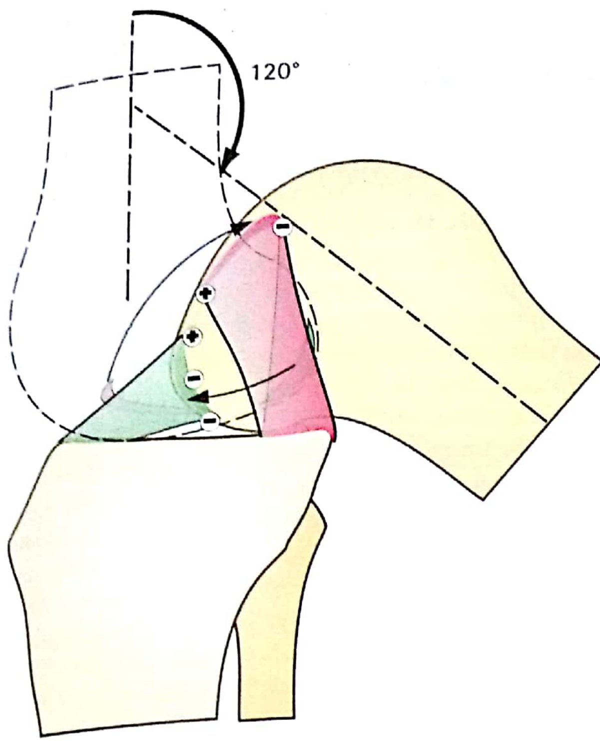


Fig. 193

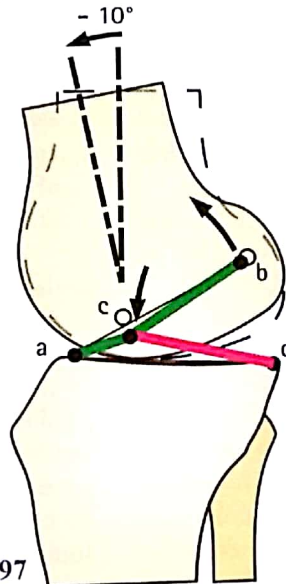


Fig. 197

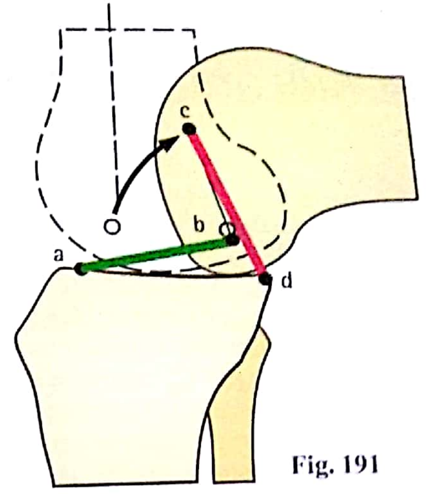


Fig. 191

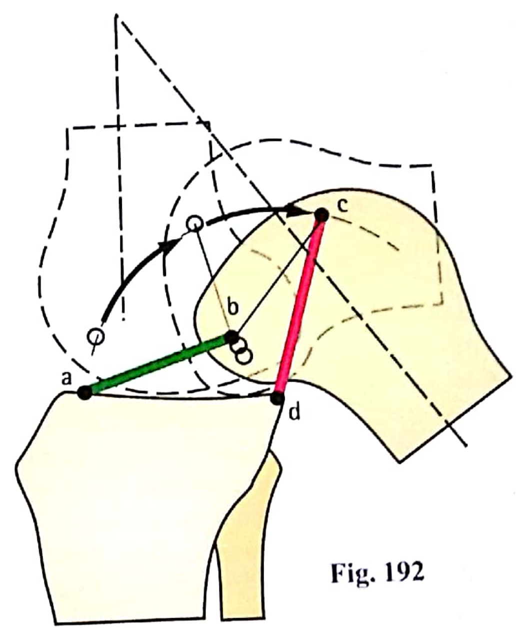


Fig. 192

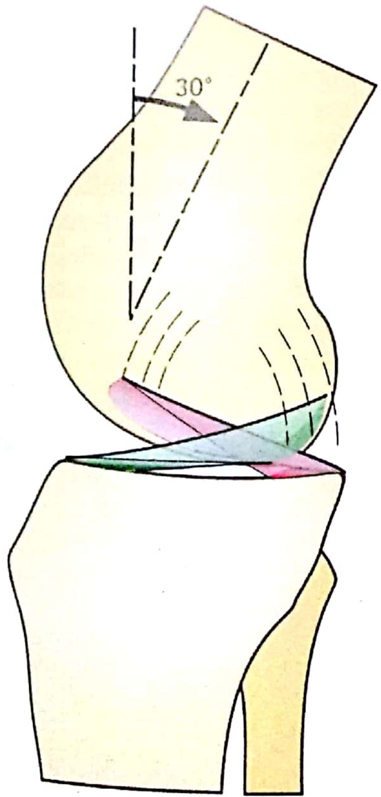


Fig. 196

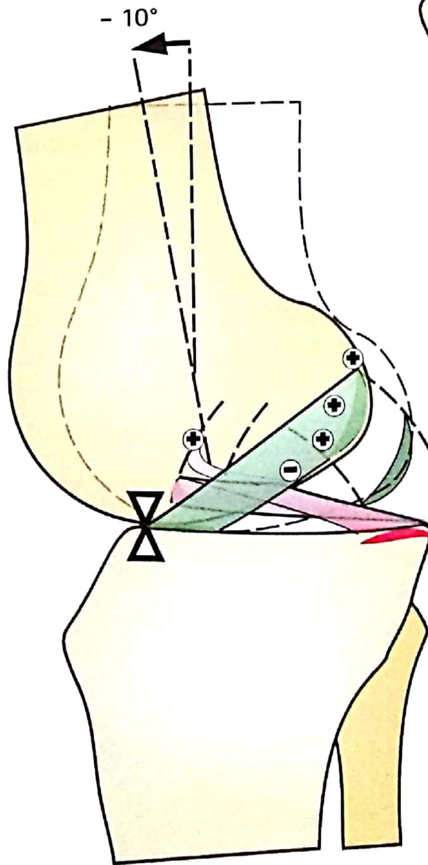


Fig. 194

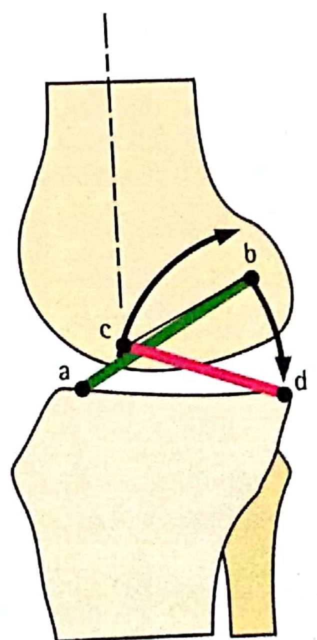


Fig. 195

Rôle mécanique des ligaments croisés *(fin)*

Le mouvement des condyles sur les glènes combine roulement et glissement (voir p. 88) ; si l'on conçoit facilement le roulement, comment expliquer le glissement dans une articulation aussi peu emboîtée que le genou ? Il y a certes des **facteurs actifs, musculaires** : les **extenseurs** tirent le tibia sous le fémur vers l'avant lors de l'extension (voir p. 142) et, inversement, les **fléchisseurs** font glisser le plateau tibial vers l'arrière lors de la flexion. Mais lorsqu'on étudie les mouvements sur une préparation anatomique, le **rôle des facteurs passifs**, et plus précisément des ligaments croisés, apparaît comme prédominant. Ce sont les ligaments croisés qui rappellent les condyles et les font glisser sur les glènes dans le sens inverse de leur roulement.

Partant de la position d'**extension I (Fig. 198)**, si le condyle roulait sans glisser, il devrait reculer en position **II** et l'insertion fémorale **b** du ligament croisé antérieur **ab** devrait venir en b'', décrivant le trajet supposé **bb'**, éventualité illustrée par la figure 97 (page 105), qui est la cause de lésions de la corne postérieure du ménisque interne. Or le point **b** ne peut se déplacer que sur un cercle de centre **a** et de rayon **ab** (en supposant le ligament inextensible) ; il s'ensuit que le trajet réel de **b** n'est pas **bb''** mais **bb'**, ce qui correspond à la position **III** du condyle, plus antérieure que la position **II** d'une longueur **e**. Lors de la flexion, le ligament croisé antérieur est sollicité et rappelle le condyle vers l'avant. On peut donc dire que **lors de la flexion, le ligament croisé antérieur est responsable du glissement du condyle vers l'avant**, associé au roulement vers l'arrière.

On démontre de la même manière **(Fig. 199)** le **rôle du ligament croisé postérieur** lors de l'extension. Passant de la position **I** à la position **II** par roulement simple, le condyle est rappelé vers l'arrière par le ligament postéro-interne **cd** ; la trajectoire de son insertion fémorale **c** n'est pas **cc'** mais **cc''** sur un cercle de centre **d** et de rayon **dc**. Il s'ensuit que le condyle glisse vers l'arrière d'une longueur **n** pour se placer en position **III**. Lors de l'extension, **le ligament croisé postérieur est responsable du glissement du condyle vers l'arrière**, associé à son roulement vers l'avant.

Cette démonstration est reprise grâce à un modèle mécanique (voir modèle I en fin d'ouvrage), qui fait apparaître la tension alternée des ligaments matérialisés par des élastiques.

Les **mouvements de tiroir** sont des **mouvements anormaux de déplacement antéro-postérieur du tibia** sous le fémur. Ils se recherchent en deux positions : sur genou fléchi à angle droit et sur genou en extension complète.

Sur **genou fléchi à angle droit (Fig. 202)** : le malade étant allongé en décubitus dorsal sur un plan dur, le genou à examiner est fléchi à angle droit, le pied posé sur la table ; l'examinateur bloque le pied du patient en s'asseyant dessus et, **des deux mains**, saisit à pleine paume l'extrémité supérieure de la jambe ; en tirant vers lui, il recherche un **tiroir antérieur**, en poussant en arrière, il recherche un **tiroir postérieur**. Cette recherche doit être faite le pied étant en rotation indifférente – *tiroir direct* – le pied en rotation externe – *tiroir en rotation externe* – et le pied en rotation interne – *tiroir en rotation interne*. Cette terminologie semble préférable à la dénomination « tiroir rotatoire externe ou interne » qui implique une idée de rotation au cours du mouvement de tiroir.

Le **tiroir postérieur (Fig. 200)** se manifeste par un déplacement du tibia sous le fémur **vers l'arrière** ; il est dû à une **rupture du ligament croisé postérieur (flèche noire)**. Le moyen mnémotechnique est facile : tiroir postérieur = croisé postérieur.

Le **tiroir antérieur (Fig. 201)** se traduit par un déplacement **vers l'avant** du tibia sous le fémur ; il est dû à une **rupture du ligament croisé antérieur**. Là encore, il est facile de retenir : tiroir antérieur = croisé antérieur.

Sur un **genou en extension**, une main soutient la face postérieure de la cuisse tandis que l'autre main, saisissant l'extrémité supérieure de la jambe, cherche à la mobiliser d'avant en arrière et vice versa : c'est le **test de Lachmann-Trillat**. Si l'on perçoit un déplacement vers l'avant, ce « **Lachmann antérieur** » est la preuve d'une rupture du **ligament croisé antérieur**, associée pour Bousquet à une rupture de la nappe fibrotendineuse postéro-externe (**PAPE**) ; cette **recherche est difficile** car le mouvement est de faible amplitude, donc difficile à affirmer.

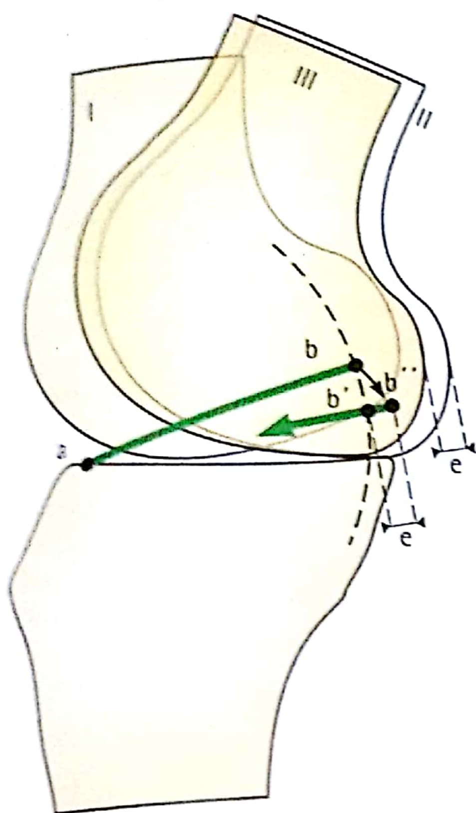


Fig. 198

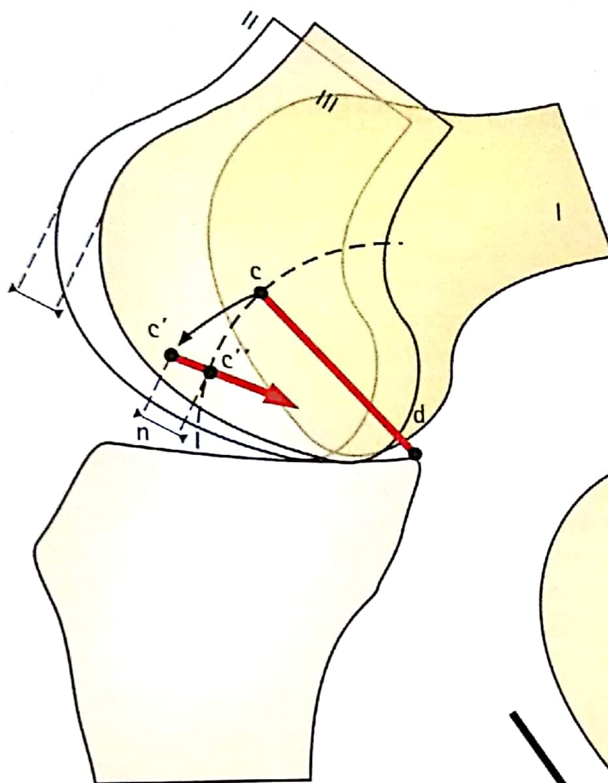
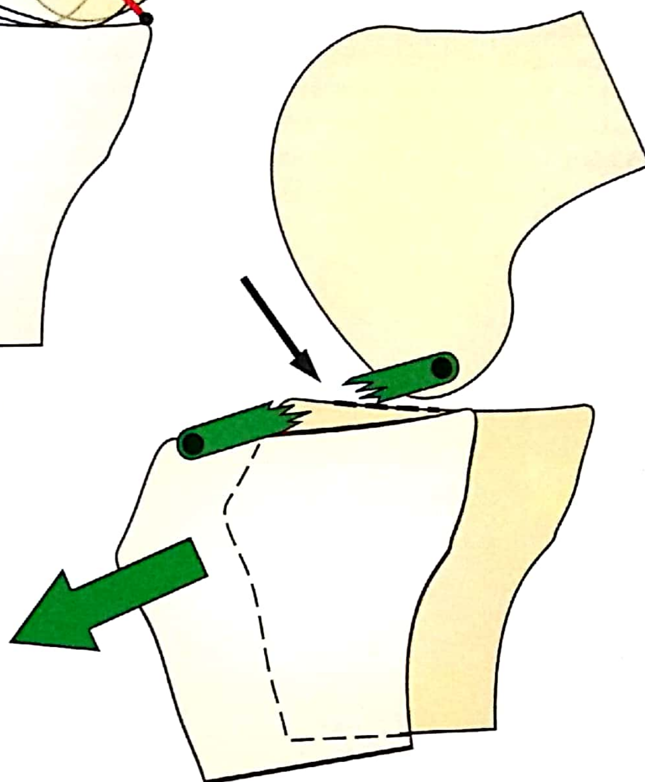
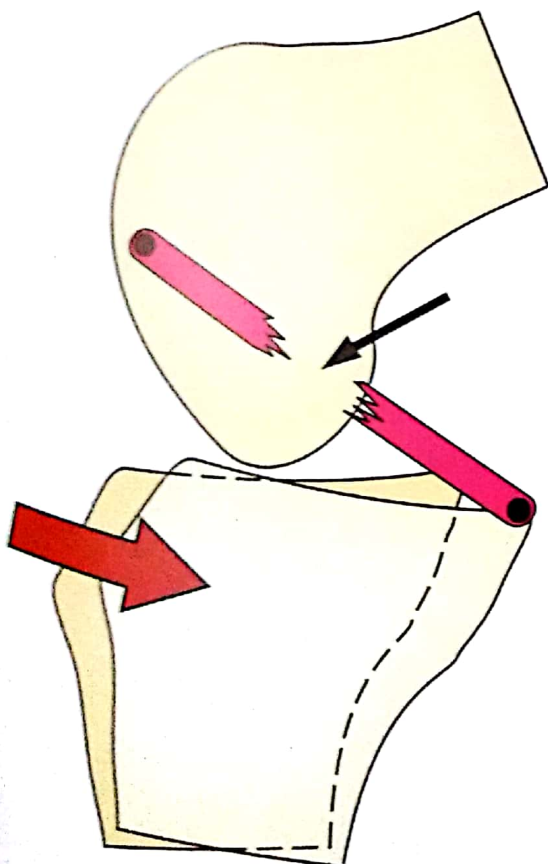
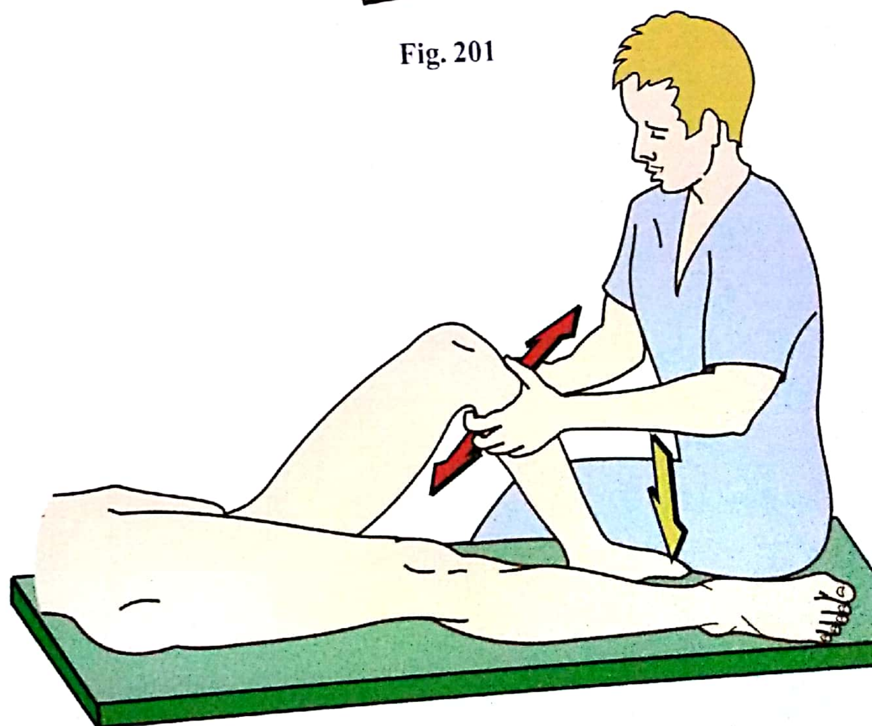


Fig. 199


Fig. 201


Fig. 200


Fig. 202

Stabilité rotatoire du genou en extension

Nous savons déjà que les mouvements de rotation longitudinale du genou ne sont possibles que lorsqu'il est fléchi. Par contre, **en extension complète, la rotation longitudinale est impossible** : elle est **interdite par la tension des ligaments latéraux et des ligaments croisés**.

Sur le **genou en rotation nulle** (**Fig. 203 : vue de face les surfaces étant écartées du fait d'une élasticité artificielle des ligaments**), les ligaments sont bien croisés l'un par rapport à l'autre, et leur obliquité bien visible sur une vue des ligaments séparés (**Fig. 204**). Dans le plan horizontal (**Fig. 205 : vue en plan, les condyles fémoraux étant transparents**), les deux ligaments croisés sont parallèles, au contact l'un avec l'autre.

Lors de la **rotation interne du tibia sous le fémur** (**Fig. 206 : vue de face**), la direction des ligaments est *nettement plus croisée dans le plan frontal* (**Fig. 207**), tandis que dans le *plan horizontal* (**Fig. 208 : vue supérieure**), ils entrent en contact mutuel par leur bord axial ; ainsi, ils s'enroulent l'un autour de l'autre et se tendent mutuellement comme les cordes d'un « tourniquet », ce qui a pour effet de **bloquer rapidement la rotation interne**.

Lors de la **rotation externe du tibia sous le fémur** (**Fig. 209 : vue antérieure**), les ligaments tendent à devenir parallèles dans le *plan frontal* (**Fig. 210**), alors que dans le *plan horizontal* (**Fig. 211 : vue supérieure**), ils tendent à perdre le contact de leur bord axial, ce qui détend le « tourniquet ». Ainsi, **la rotation externe n'est pas arrêtée par la mise en tension des ligaments croisés**.

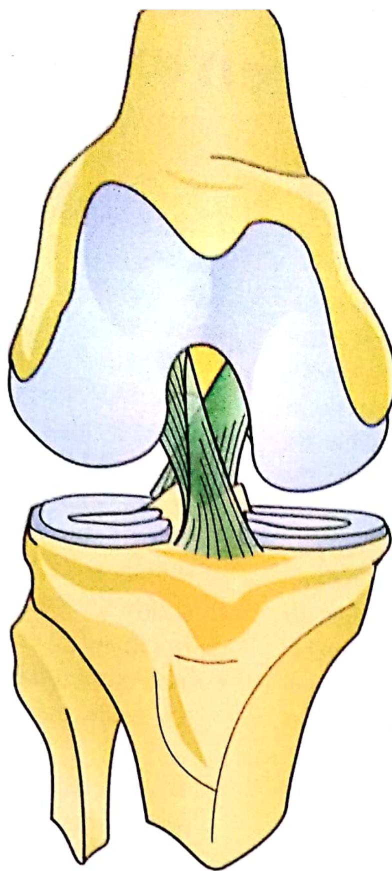


Fig. 203

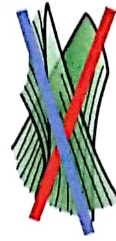


Fig. 204



Fig. 206



Fig. 207

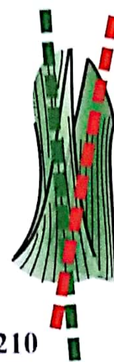


Fig. 210

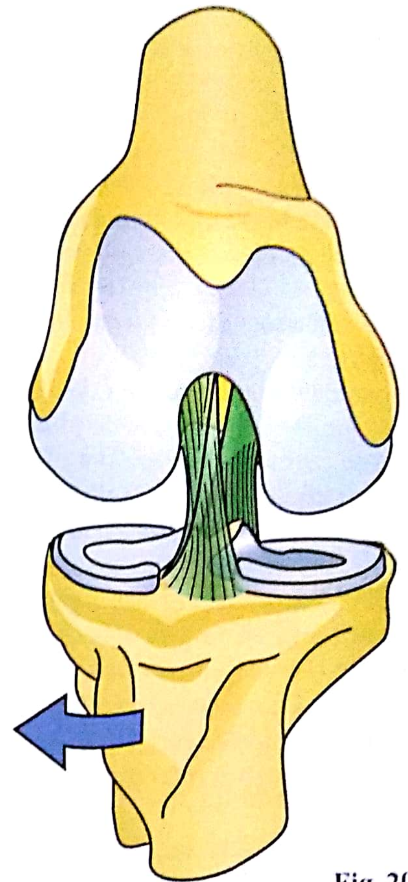


Fig. 209

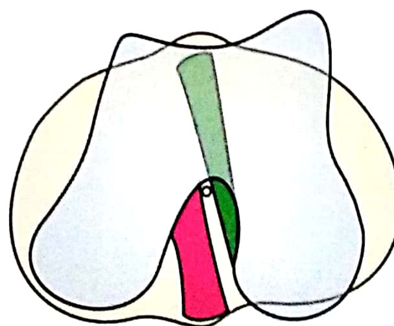


Fig. 205

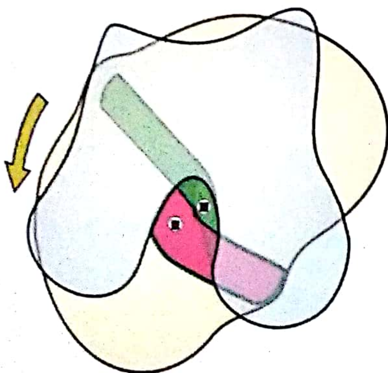


Fig. 208

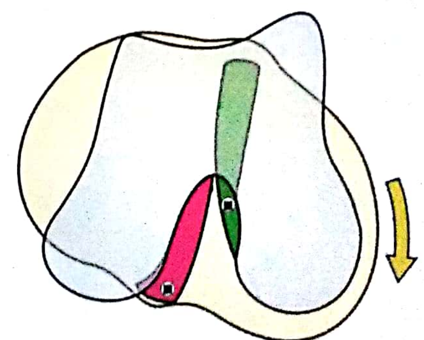


Fig. 211

Stabilité rotatoire du genou en extension *(suite)*

Quelles vont être les conséquences sur la stablilité du genou en rectitude, des contraintes de rotation du tibia sous le fémur ?

Sur genou en extension complète, lors des **contraintes en rotation interne du tibia sous le fémur (Fig. 212 : vue supérieure détaillée, les condyles fémoraux sont supposés transparents)**, le tibia tourne non pas autour d'un centre situé au niveau de la fosse entre les tubercules intercondylaires, mais autour du centre réel, marqué d'une croix, qui correspond au versant interne du tubercule intercondylaire médial.

Simultanément, comme le centre de cette rotation – marqué par une croix – **(Fig. 212)** ne coïncide pas avec le centre de l'articulation **(cercle blanc)**, ce mouvement excentré a pour résultat de *détendre le ligament croisé postérieur* **(en rouge)** et de *tendre le ligament croisé antérieur* **(en vert)** ainsi que son expansion à la corne antérieure du ménisque interne, qui se trouve ramenée vers l'arrière.

Les ligaments sont en contact de plus en plus serré **(Fig. 213 : vue des ligaments isolés)** et de plus en plus croisés. Si le mouvement se poursuivait **(Fig. 214 : le tibia a subi une rotation interne artificielle de 180°)**, ils s'enrouleraient l'un autour de l'autre, d'où un raccourcissement qui rapprocherait le fémur du tibia **(flèches noires)**. C'est en fait ce qui se produit dans la réalité : l'enroulement des ligaments croisés applique plus fortement les surfaces articulaires l'une contre l'autre d'où un **blocage de la rotation interne**.

La rotation interne tend le ligament croisé antérieur et détend le ligament croisé postérieur.

Les ligaments croisés interdisent la rotation interne du genou étendu.

Inversement, toujours sur genou en extension complète, lors des **contraintes en rotation externe du tibia sous le fémur (Fig. 215 : vue supérieure, condyles transparents)**, la rotation du tibia sous le fémur s'effectue autour du centre réel, marqué d'une croix, et ce mouvement excentré *tend* le ligament croisé postérieur **(en rouge)** et *détend le ligament croisé antérieur* **(en vert)**. Les ligaments ont tendance à devenir parallèles **(Fig. 216)**, et si l'on poursuivait le mouvement de rotation externe **(Fig. 217 : la rotation n'a été que d'un quart de tour)**, les ligaments seraient parallèles, ce qui permettrait un faible écartement des surfaces articulaires **(flèches noires)**.

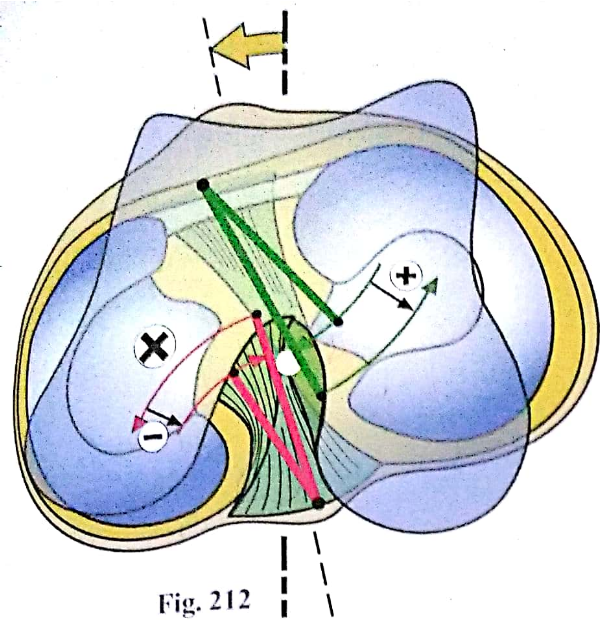
Les ligaments croisés ne limitent pas la rotation externe du genou étendu.

Donald B. Siocum et Robert L. Larson (*J. Bone ans Joint Surg.*, mars 1968) ont étudié la stabilité rotatoire du genou en flexion chez les sportifs, les joueurs de football en particulier, qui, lorsqu'ils tournent brusquement vers le côté opposé à la jambe porteuse, sollicitent violemment leur genou en rotation externe. Ces auteurs ont démontré le rôle important de la partie interne de la capsule :

- son tiers antérieur est très exposé à la rupture si le traumatisme en valgus-rotation externe survient sur le genou fléchi à 90° ;
- son tiers postérieur est vulnérable si le genou est en extension ;
- son tiers moyen, assimilé à un faisceau profond du ligament collatéral tibial est rompu si le traumatisme frappe un genou fléchi de 30 à 90° ;
- en outre, si le genou est fléchi à 90° ou plus, le ligament croisé antérieur commence par se détendre pendant les 15-20 premiers degrés de rotation externe, puis se tend et peut même se rompre en s'enroulant sur la face axiale du condyle externe, si la rotation externe se poursuit ;
- enfin, la moitié postérieure du ménisque interne, par ses connexions capsulaires sur le tibia, peut à elle seule empêcher la rotation externe sur le genou fléchi.

Au total, un **traumatisme en valgus-rotation externe sur genou fléchi** entraîne successivement et suivant une force croissante :

- une rupture du ligament collatéral tibial, couche profonde d'abord, puis fibres superficielles ;
- une rupture du ligament croisé antérieur ;
- une désinsertion du ménisque interne.


Fig. 212

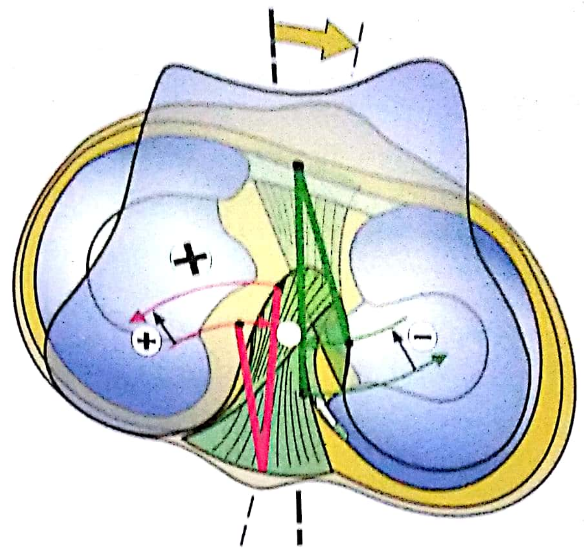
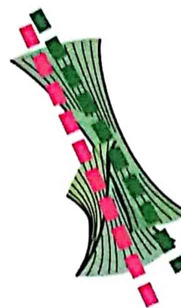
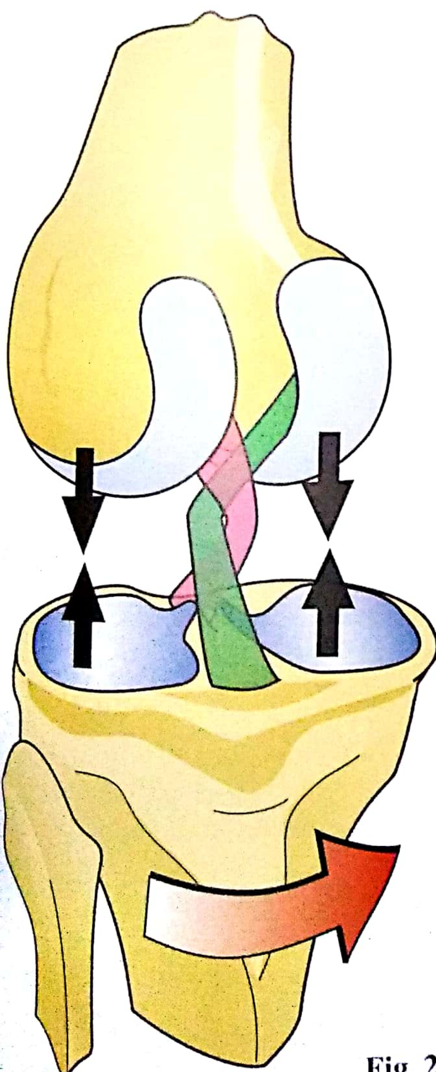
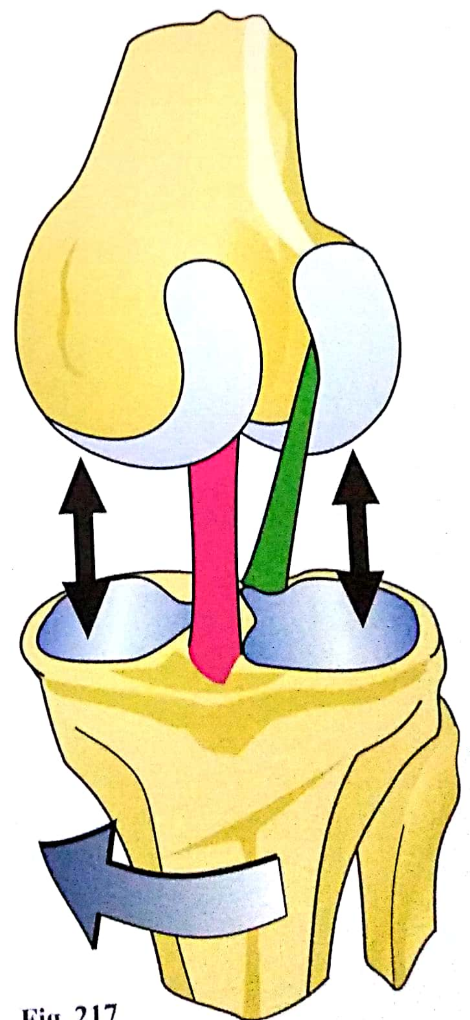

Fig. 215


Fig. 213


Fig. 216


Fig. 214


Fig. 217

Stabilité rotatoire du genou en extension

Le rôle des ligaments collatéraux dans la stabilité rotatoire du genou peut être expliqué par des raisons symétriques.

En position de **rotation nulle (Fig. 218 : vue supérieure, condyles transparents)**, l'obliquité du ligament collatéral tibial en bas et en avant, et du ligament collatéral fibulaire en bas et en arrière, fait qu'ils amorcent un mouvement d'*enroulement autour de l'extrémité supérieure du tibia*.

La **rotation interne (Fig. 219)** s'oppose à cet enroulement et l'obliquité des ligaments collatéraux diminue, si bien qu'ils tendent à *devenir parallèles* **(Fig. 220 : vue postéro-interne, surfaces « écartées »)** ; comme l'enroulement diminue, les surfaces articulaires sont moins fortement appliquées l'une sur l'autre par les ligaments latéraux alors qu'elles le sont plus fortement par les ligaments croisés. **Le « jeu » autorisé par le relâchement des ligaments latéraux est compensé par la tension des croisés**.

Inversement, la **rotation externe (Fig. 221)** accentue l'enroulement, ce qui rapproche les surfaces articulaires **(Fig. 222 : vue postéro-interne)** et limite le mouvement, alors que les croisés sont détendus.

Au total, on peut dire que les ligaments latéraux limitent la rotation externe et les ligaments croisés la rotation interne.

La **stabilité rotatoire du genou en extension** est donc assurée par les **ligaments latéraux dans la rotation externe** et par les **ligaments croisés dans la rotation interne**.

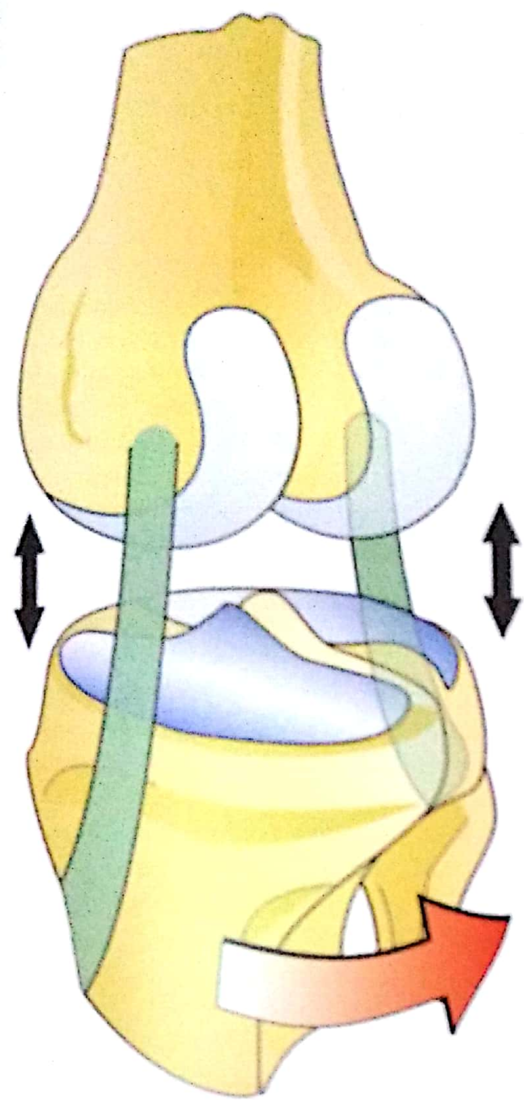


Fig. 220

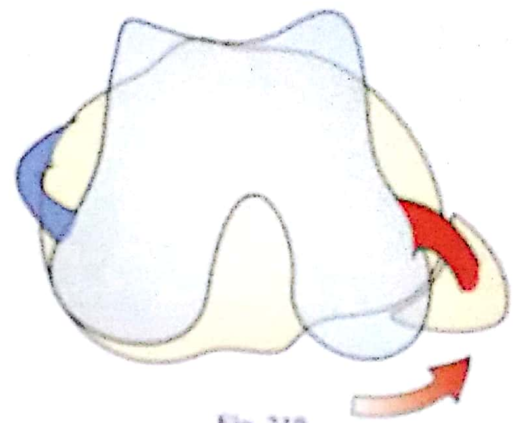


Fig. 219

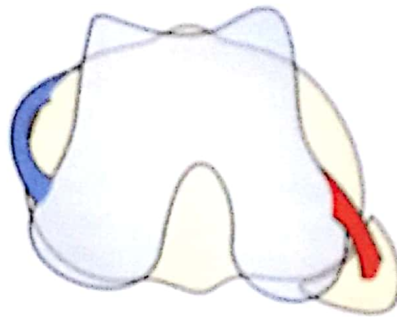


Fig. 218

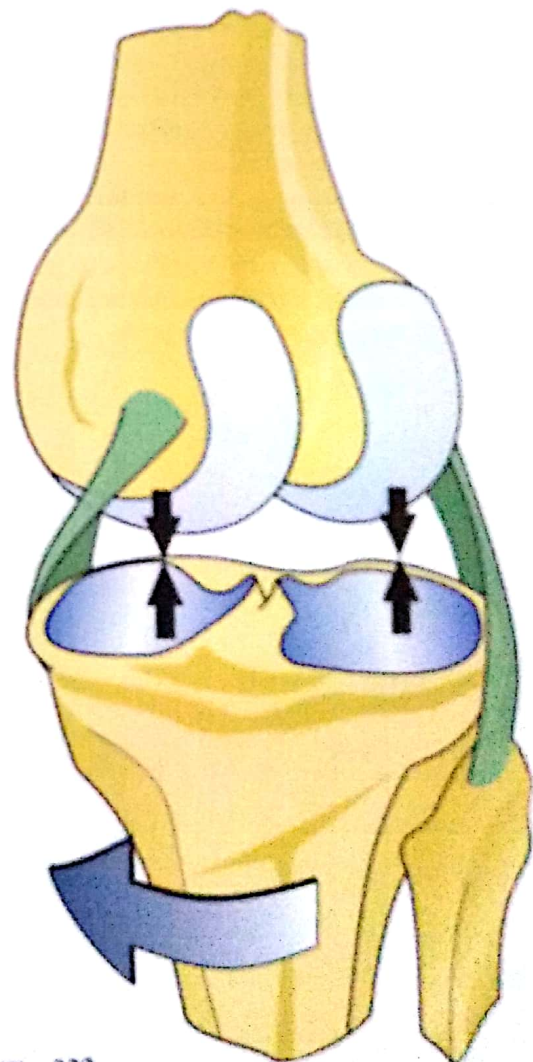


Fig. 222

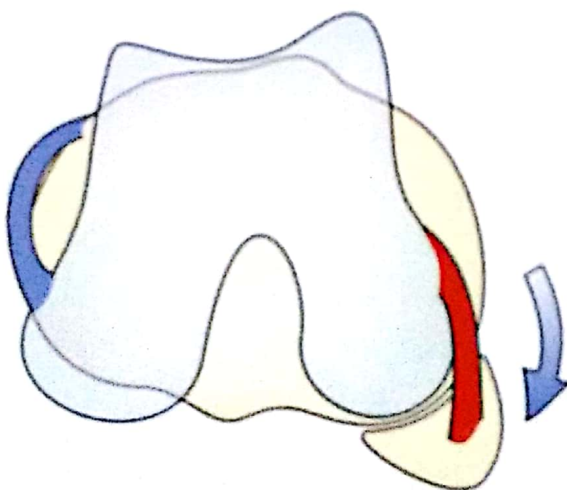


Fig. 221

Les tests dynamiques en rotation interne

À côté des tests statiques de stabilité du genou, bien classiques, comme la **recherche de latéralité** ou de **tiroir**, ont été mis au point des **tests dynamiques de stabilité** (ou d'instabilité) cherchant à faire apparaître *un mouvement anormal au cours même d'un mouvement d'épreuve*. Ces tests dynamiques d'instabilité sont nombreux (chaque école de chirurgie du genou en propose un nouveau par congrès) si bien qu'il est nécessaire de tenter de les classer et surtout de mettre en relief les plus significatifs.

Il est pratique de ranger ces tests dynamiques en **deux groupes** :

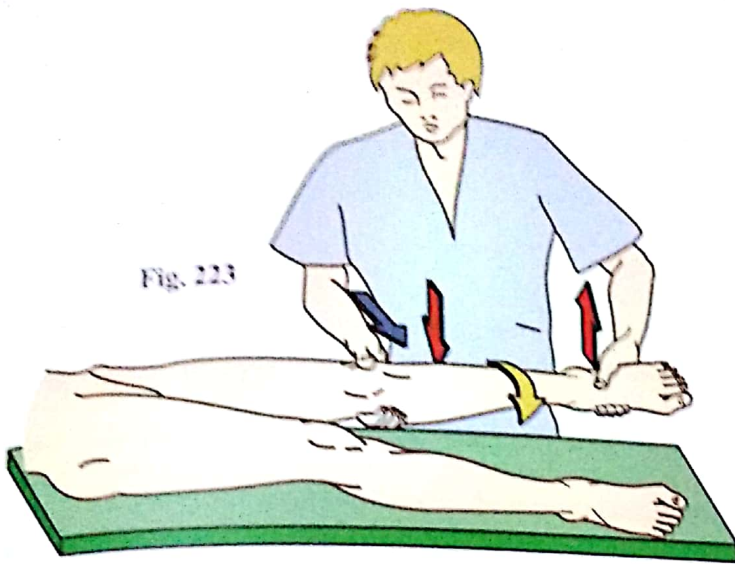
- les tests en **valgus-rotation interne** ;
- les tests en **valgus-rotation externe**.

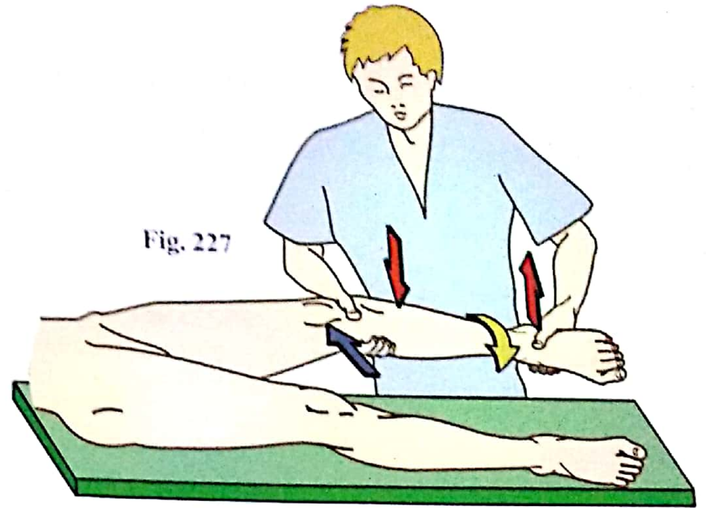
Voici d'abord les tests dynamiques en valgus-rotation interne.

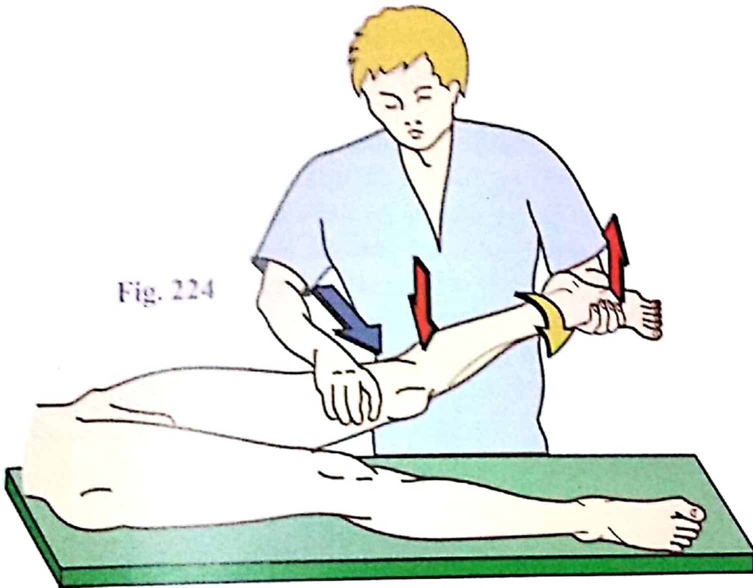
Le test de MacIntosh ou ***Latéral Pivot Shift Test*** est le plus connu et le plus utilisé. Il peut se rechercher sur un patient en décubitus dorsal **(Fig. 223)** ou bien en inclinaison à 45° **(Fig. 224)**. Dans le premier cas, la main qui soutient le pied le saisit par la plante tout en lui imprimant une rotation interne forcée, alors que le propre poids du membre imprime un valgus au genou. Dans le deuxième cas, cette main prend le pied par le cou-de-pied en passant sous la cheville, la rotation interne étant créée par une extension du poignet de l'examinateur. La position de départ du genou est l'extension **(Fig. 223)** ; la main libre pousse alors le genou en avant pour amorcer la flexion et en bas pour accentuer le valgus. Au cours de ce mouvement de flexion **(Fig. 224)**, vers 25-30°, après avoir éprouvé une résistance, on perçoit un déblocage subit tandis qu'on ressent et qu'on voit le condyle fémoral latéral littéralement sauter en avant de la surface articulaire proximale externe.

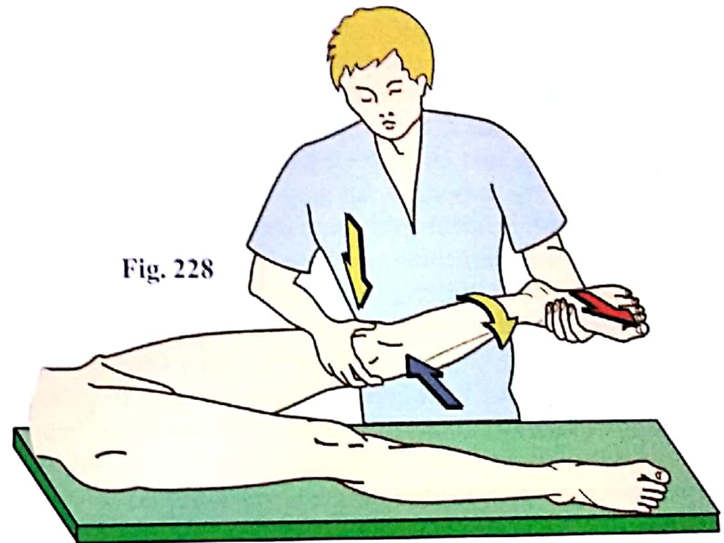
La positivité du test de Mac-Intosh, l'existence d'un ressaut externe en rotation interne témoignent d'une **rupture du ligament croisé antérieur**. En effet, le ligament croisé antérieur limitant la rotation interne, si le genou est en extension, en rotation interne **(Fig. 225)**, *le condyle fémoral latéral se place en subluxation postérieure* **SLP** sur le versant postérieur **1** du dos d'âne de la glène externe ; il est maintenu dans cette situation par la tension du fascia lata **FL** et le valgus qui appliquent étroitement le condyle sur la glène. Tant que le fascia lata reste en avant du dos d'âne, le condyle reste bloqué en subluxation postérieure, mais dès que ce point est dépassé *du fait de la flexion croissante* **(Fig. 226)**, le condyle franchit le sommet **S** et se bloque en avant **2** sur le versant antérieur, où il est retenu **(Fig. 226)** par le ligament croisé postérieur **(en rose)**. Fait important, c'est cette même **sensation de ressaut qui est perçue spontanément par le patient**.

Le ***Jerk Test*** **de Hughston** est l'inverse du test de MacIntosh. Il se recherche de même soit sur le patient en décubitus dorsal symétrique **(Fig. 227)**, soit sur le patient en décubitus intermédiaire **(Fig. 228)**, incliné à 45°, avec les mêmes positions de mains. La différence est que l'on part d'une position de flexion à 35-40° pour ramener le genou en extension, tout en maintenant la rotation interne du pied et la contrainte en valgus du genou. Le condyle fémoral latéral part donc **(Fig. 225)** de sa position « avancée » **(en pointillé)** correspondant à un contact avec le versant antérieur de la glène externe **2**, pour « sauter » brusquement **1** en subluxation postérieure, n'étant pas retenu par le ligament croisé antérieur, dès qu'on se rapproche de l'extension. Un **Jerk Test positif indique aussi une rupture du ligament croisé antérieur.**


Fig. 223


Fig. 227


Fig. 224


Fig. 228

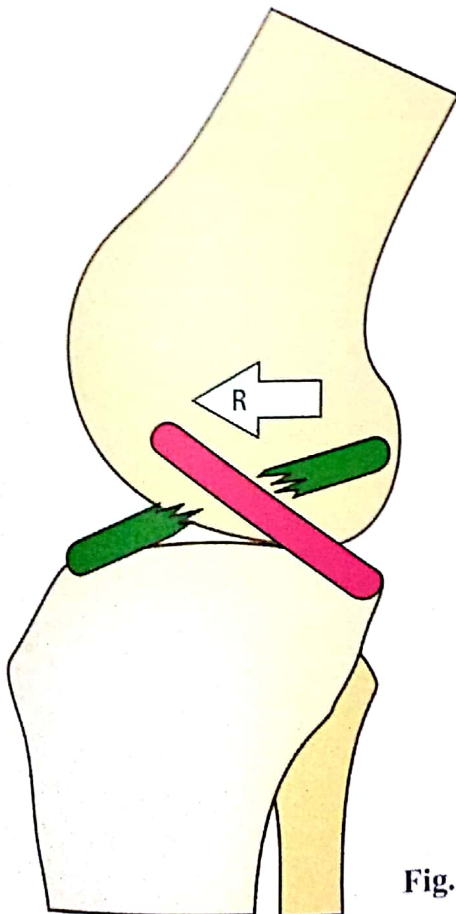


Fig. 226

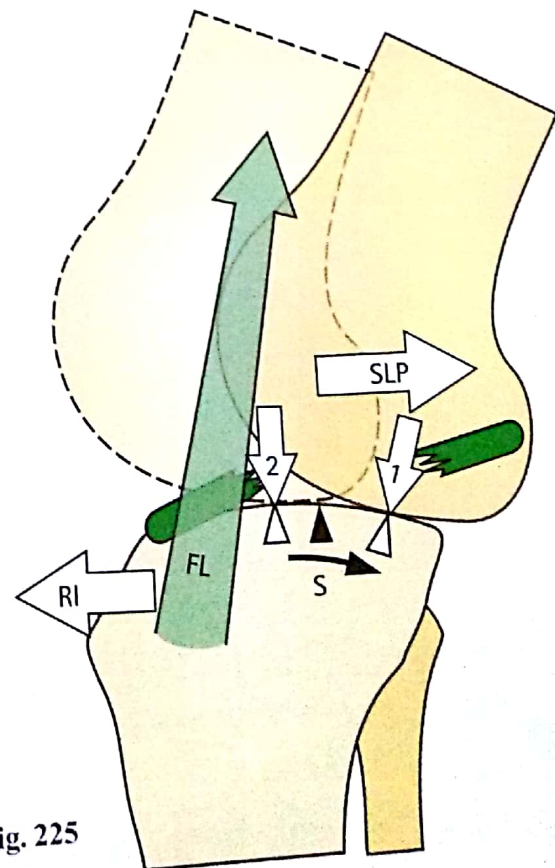


Fig. 225

Les tests dynamiques de rupture du ligament croisé antérieur

Si les tests de MacIntosh et de Hughston sont les plus utilisés, les plus faciles à rechercher et les plus fiables, ils ne sont pourtant pas les seuls à mettre en évidence une rupture du ligament croisé antérieur. Trois autres tests le peuvent aussi ; ce sont les tests de Losee, de Noyes et de Slocum.

Le **test de Losee (Fig. 229)** se recherche sur le sujet en décubitus dorsal ; d'une main, l'examinateur soutient le talon en maintenant le genou fléchi à 30°, de l'autre, il empaume le genou par sa face antérieure, son pouce s'accrochant sur la tête de la fibula. Simultanément, il imprime une *rotation externe* par la première main, ce qui empêche toute subluxation postérieure du condyle latéral, et un valgus par la deuxième ; c'est alors qu'il porte *le genou en extension* tout en *relâchant la rotation externe* – ce dernier point est très important, car sans cela, le test serait dans tous les cas négatif. Pendant qu'il complète l'extension, le pouce de la main qui tient le genou repousse la fibula vers l'avant. Lorsque le test est positif, un *ressaut de la surface articulaire proximale vers l'avant* se produit en fin d'extension.

Le **test de Noyes (Fig. 230)**, ou *Flexion Rotation Drawer Test*, est recherché aussi sur le patient en décubitus dorsal, genou fléchi à 20-30° et en rotation indifférente ; les mains de l'examinateur se bornent à soutenir la jambe, et c'est le seul poids de la cuisse qui entraîne une **subluxation postérieure** du condyle latéral **(les deux flèches rouges)** et une rotation externe du fémur. Il est possible de réduire cette subluxation en poussant vers l'arrière **(flèche jaune)** l'extrémité supérieure du tibia, comme lorsqu'on recherche un tiroir postérieur, d'où le nom anglais de ce test qui révèle, lui aussi, une rupture du ligament croisé antérieur.

Le **test de Slocum (Fig. 231)** se recherche sur le patient couché sur le dos, à demi-tourné vers le côté opposé, le membre à examiner restant posé sur le plan d'examen : ainsi, de par son propre poids, lorsque le genou est en extension, il se trouve *automatiquement en valgus-rotation interne* ; ne pas devoir soutenir le membre est d'un grand intérêt chez les sujets lourds. Les deux mains de l'examinateur étant placées au niveau du genou, de part et d'autre de l'interligne, il le fléchit progressivement, tandis qu'il accentue le valgus. Comme dans le test de MacIntosh, un *ressaut apparaît pour 30-40°* de flexion, et comme dans le test de Hughston, *il se reproduit en sens inverse* lorsque le genou en ramené en extension. Ce test de Siocum traduit aussi une **rupture du ligament croisé antérieur**.

Si ces cinq tests sont très significatifs d'une rupture du ligament croisé antérieur, cependant dans deux circonstances ils peuvent être *infidèles* :

- chez les jeunes filles hyperlaxes, ils peuvent être positifs en l'absence de rupture ligamentaire, d'où l'*intérêt d'examiner le côté opposé* qui peut aussi être hyperlaxe ;
- une importante lésion de la nappe fibro-tendineuse postéro-interne empêche le blocage du condyle latéral sous l'action du valgus et peut rendre difficile la mise en évidence d'un ressaut.

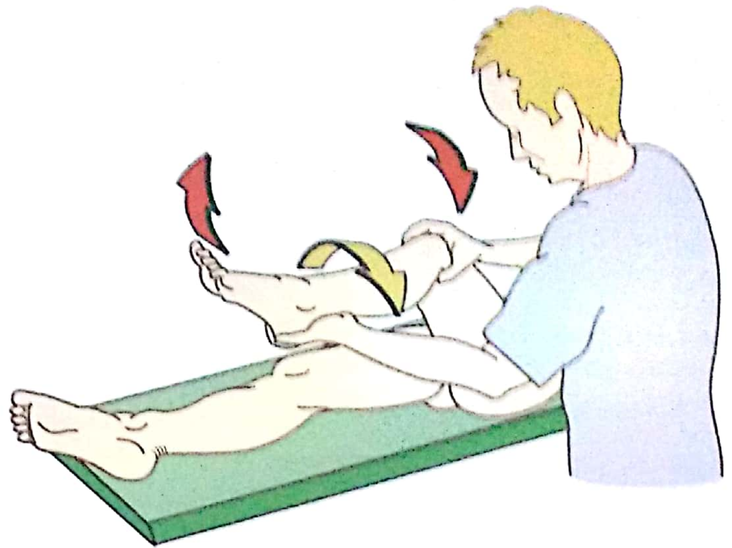


Fig. 229

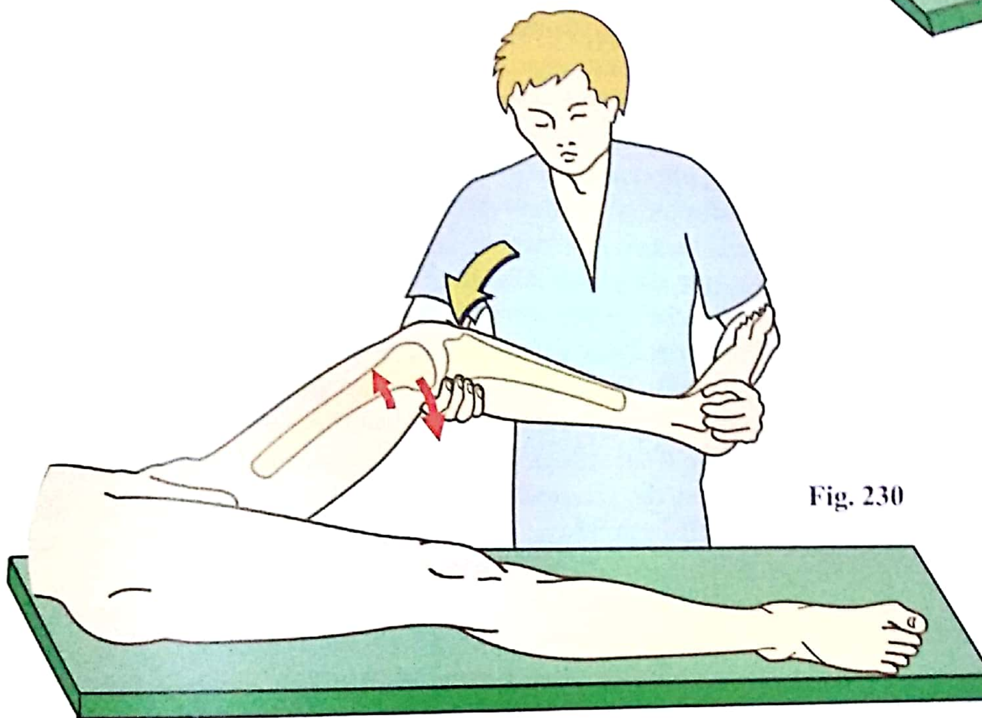


Fig. 230

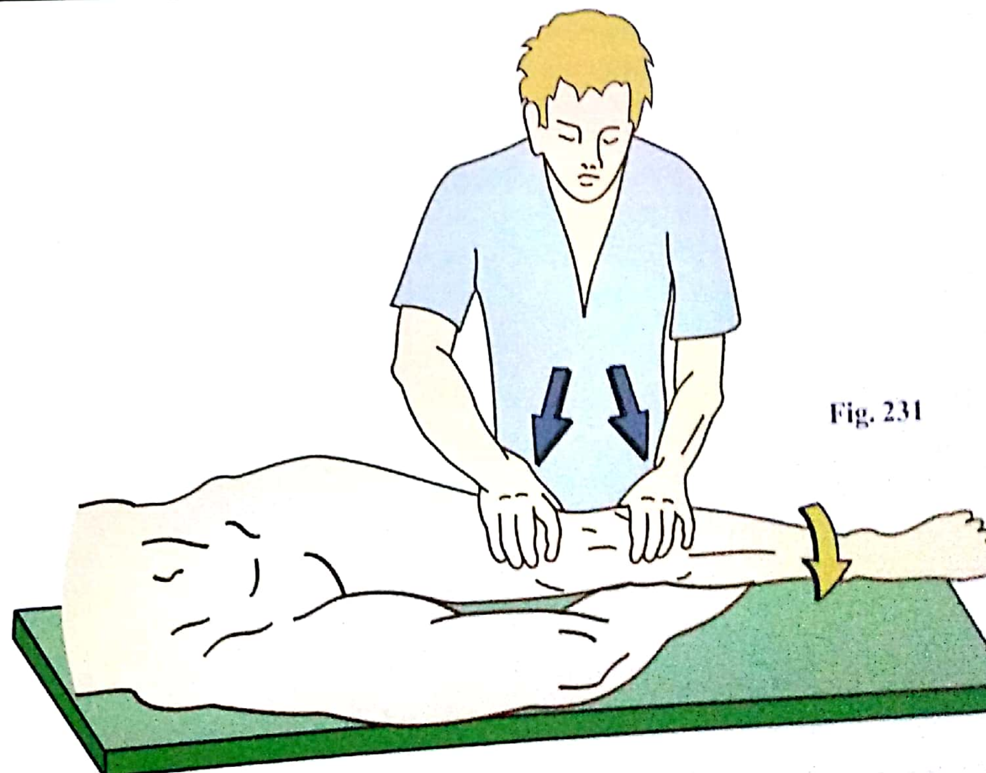


Fig. 231

Les tests dynamiques en rotation externe

L'examen d'un genou ne serait pas complet sans les **tests dynamiques en rotation externe**, qui recherchent un ressaut externe en rotation externe.

Le **test en rotation externe, valgus, extension** ou ***Pivot Shift Reverse Test*** (Fig. 232) est constitué par la même manœuvre que le test de MacIntosh, où la rotation interne est remplacée par une rotation externe de la jambe imprimée par la main qui tient le pied. En partant d'un position de flexion de flexion à 60-90°, l'extension progressive, combinée à une pression continue sur la face externe du genou, fait apparaître, alors que l'extension n'est plus que de 30° (**Fig. 233**), un *brusque ressaut du condyle fémoral latéral* vers la pente postérieure de la glène tibiale externe.

En effet, lorsque le *genou est fléchi, en rotation externe* (**Fig. 235**), le condyle latéral, qui n'est plus retenu par la tension du ligament croisé postérieur (**en rouge**) en rotation externe RE, se subluxe en avant SLA sur la pente antérieure du dos d'âne de la glène externe (**flèche 1**). Lors de l'extension progressive (**Fig. 234**), le tractus ilio-tibial ou ancienne bandelette de Maissiat TFL passe en avant du point de contact entre le condyle et la glène, si bien que le condyle latéral est ramené en arrière (**Fig. 235**) dans sa position normale (**pointillé**) franchissant brusquement le sommet du dos d'âne S pour prendre contact (**flèche 2**) avec le versant postérieur de la glène. La perception du ressaut, par le malade lui même lors des épisodes d'instabilité et par l'examinateur lors de cette manœuvre, est donc due à la *réduction brusque de la subluxation antérieure du condyle latéral*, rendue possible par la **rupture du ligament croisé postérieur (en rouge)**.

Le **test en rotation externe, valgus, flexion (Fig. 236)** se recherche par la même manœuvre, mais *en partant de l'extension complète :* le ressaut perçu lorsque la flexion atteint 30° correspond (**Fig. 235**) à la subluxation antérieure **SLA** du condyle latéral qui saute brusquement par-dessus le sommet de la glène externe S de sa position normale (**flèche 2**) sur la pente postérieure de la glène externe à une position anormale (**flèche 1**) sur le versant antérieur, ce qui est rendu possible par la rupture du ligament croisé postérieur.

Trois autres tests permettent de reconnaître une **lésion de la nappe fibro-tendineuse postéro-externe** (ou **PAPE**) et du **ligament collatéral fibulaire** en l'absence de rupture du ligament croisé postérieur.

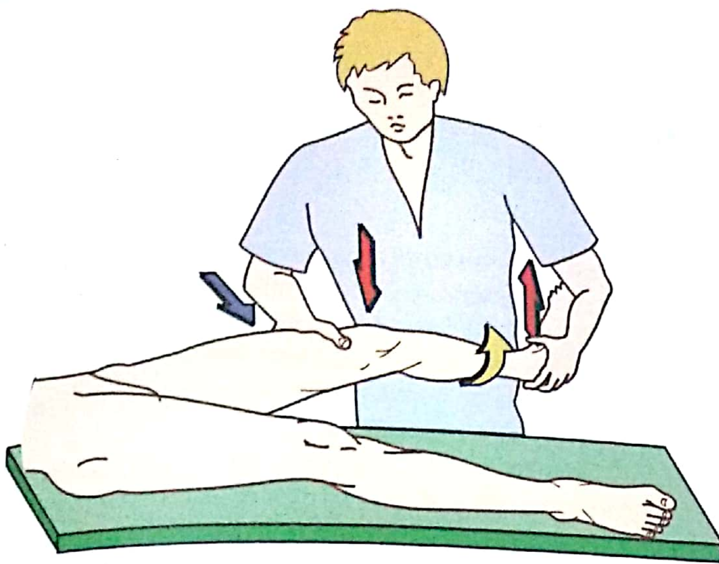
Le **test de tiroir postéro-latéral** ou ***Postero-Lateral Drawer Test*** **de Hughston** : les pieds étant posés à plat sur le plan d'examen, les hanches se trouvent fléchies à 45° et les genoux à 90°. En s'asseyant sur le pied (Fig. 202, p. 129), l'examinateur peut bloquer la rotation du genou successivement en rotation neutre, externe 15° et interne 15°. Enserrant de ses deux mains l'extrémité supérieure du tibia, il cherche à créer un tiroir postérieur dans ces trois positions. Le test est positif lorsqu'on note une subluxation postéro-externe du surface articulaire proximale externe, alors que le plateau interne ne recule pas – c'est donc **un vrai tiroir rotatoire** – en rotation externe du pied, qui s'estompe en rotation nulle et disparaît en rotation interne du fait de la mise en tension du ligament croisé postérieur intact.

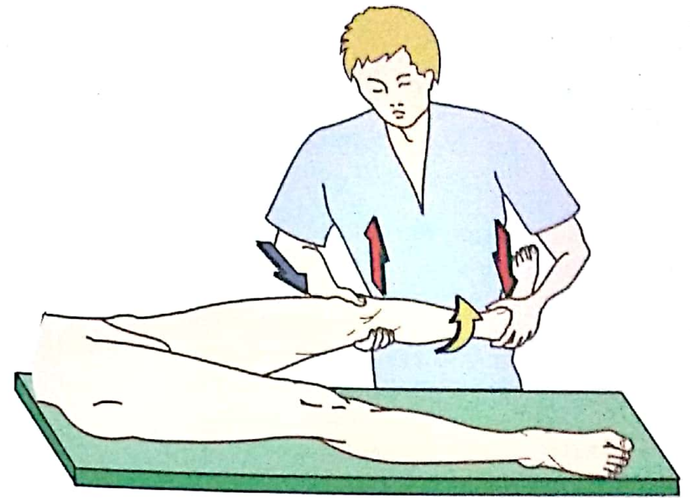
Le **test en hyper-mobilité externe de Bousquet ou HME** se recherche sur genou fléchi à 60°. En appliquant une pression sur l'extrémité supérieure du tibia pour tenter de le faire glisser en bas et en arrière des condyles, on perçoit un ressaut postérieur tandis que le pied tourne en rotation externe. Il s'agit donc là encore d'un *vrai tiroir rotatoire externe*.

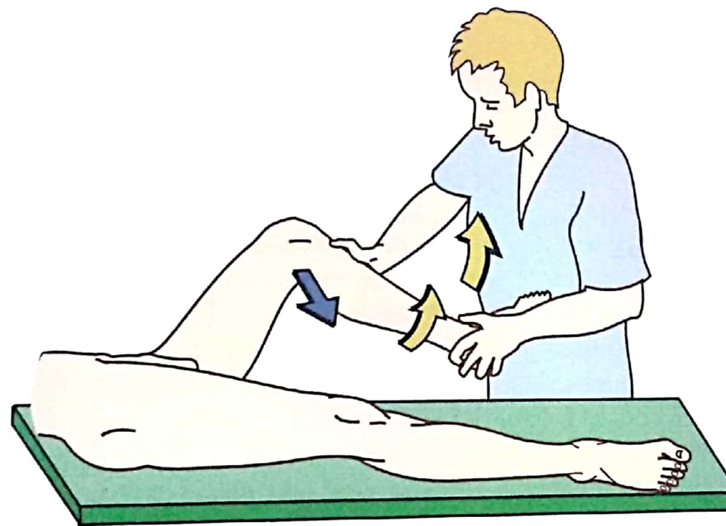
Le **test de recurvatum, rotation externe** peut se rechercher de deux manières, en s'assurant dans les deux cas d'un bon relâchement du quadriceps :

- soit **en extension** ; les deux membres inférieurs, tenus par l'avant-pied, sont soulevés en extension, ce qui entraîne, du côté du membre traumatisé, un recurvatum et une rotation externe, traduite par un déplacement de la TTA vers le dehors ; la subluxation postéro-externe de la surface articulaire proximale externe produit un aspect du genu varum ;
- soit **en flexion** ; tandis qu'une main soutient le pied et porte progressivement le genou en extension, celle qui soutient le genou perçoit la subluxation postéro-externe du tibia se traduisant par un recurvatum, un genu varum et un déplacement de la TTA en dehors.

Tous ces tests, quelquefois difficiles à mettre en évidence sur un patient éveillé, au relâchement musculaire imparfait, apparaissent avec toute leur netteté sous anesthésie générale.


Fig. 233


Fig. 236


Fig. 232

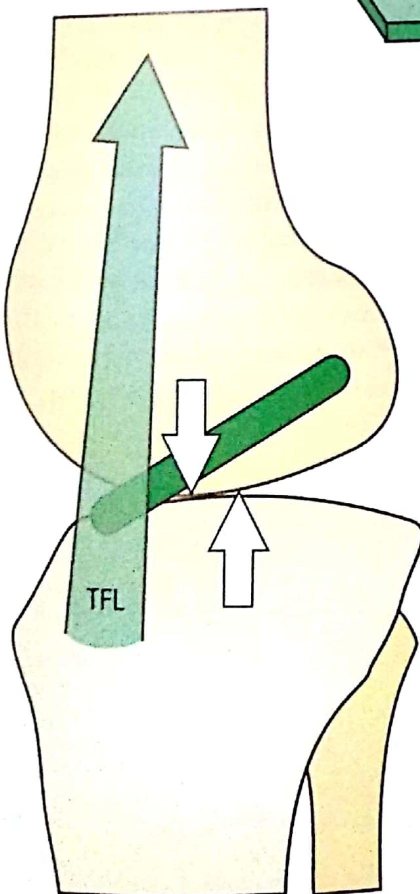


Fig. 234

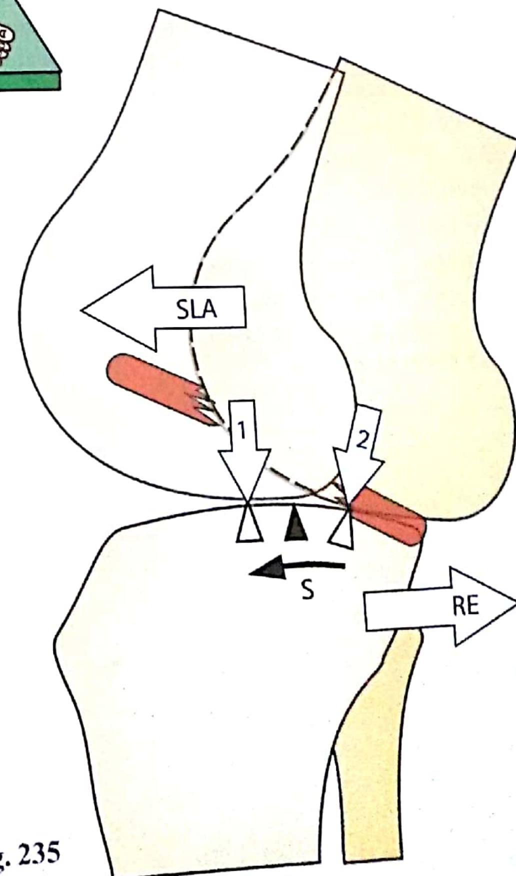


Fig. 235

Les muscles extenseurs du genou

Le muscle quadriceps fémoral est **le muscle extenseur du genou**. C'est même le seul muscle capable d'exécuter ce mouvement. Il est le *deuxième muscle le plus puissant*, après le muscle grand fessier : sa surface de section physiologique est de 148 cm, ce qui, avec une course de 8 cm, lui confère une puissance de 42 kgm. Le quadriceps est *trois fois plus puissant que les muscles fléchisseurs* ; ceci s'explique très bien par le fait qu'il doive lutter en permanence contre la pesanteur. Nous avons vu cependant que lorsque le genou est en hyperextension, l'action du quadriceps n'est pas nécessaire pour maintenir la station debout (voir p. 114) ; mais dès que commence la moindre flexion, le quadriceps est indispensable et doit intervenir très énergiquement pour empêcher la chute par flexion du genou.

Le quadriceps **(Fig. 237)** est formé, comme son nom l'indique, de **quatre corps musculaires** s'insérant par un appareil extenseur commun sur la tubérosité tibiale **TT** :

- trois muscles *mono-articulaires* : le vaste intermédiaire **1**, le vaste latéral **2** et le vaste médial **3** ;
- un muscle *bi-articulaire* : le muscle droit de la cuisse **4**, dont nous étudierons la physiologie bien spéciale à la page suivante.

Les trois muscles mono-articulaires sont *seulement extenseurs du genou*, avec cependant une composante latérale, en ce qui concerne les vastes ; il faut noter à ce propos que le muscle vaste médial, plus puissant que le latéral, descend plus bas et que sa prédominance relative est destinée à *s'opposer à la tendance de la luxation externe de la patella*. La contraction normalement équilibrée des deux muscles vastes engendre une force résultante dirigée vers le haut, dans l'axe de la cuisse. Mais si l'un des muscles vastes prédomine sur l'autre, par exemple si le muscle vaste latéral l'emporte sur un muscle vaste médial insuffisant, la patella « échappe » en dehors : c'est l'un des mécanismes invoqués dans la *luxation récidivante de la patella*, qui est *toujours externe*. Inversement, il est possible de s'opposer à la subluxation externe de la patella par un **renforcement sélectif du muscle vaste médial**.

La patella est un **os sésamoïde** inclus dans l'**appareil extenseur du genou** entre le tendon quadricipital en haut et le ligament patellaire en bas. Elle joue un **rôle essentiel** : elle accroît l'efficacité du quadriceps en reportant vers l'avant sa force de traction. Il n'est pour s'en convaincre que de tracer le **diagramme des forces** avec et sans la patella.

La force **Q** du quadriceps appliquée sur la patella **(Fig. 238 : diagramme avec la patella)** peut être décomposée en deux vecteurs : une force **Q1**, dirigée vers l'axe de flexion-extension, qui applique la patella contre la trochlée, et une force **Q2**, dirigée dans le prolongement du ligament patellaire. À son tour, cette force **Q2** appliquée sur la tubérosité tibiale peut être décomposée en deux vecteurs perpendiculaires entre eux : une force **Q3** dirigée vers l'axe de flexion-extension, qui applique le tibia sous le fémur, et une force **Q4**, tangentielle, qui est la **seule composante efficace pour l'extension**. Elle fait *glisser vers l'avant le tibia sous le fémur*.

Supposons la patella enlevée **(Fig. 239 : diagramme sans la patella)** – opération appelée « patellectomie » – et reprenons le même raisonnement : la force **Q** du quadriceps, en supposant qu'elle soit identique, est appliquée tangentiellement à la trochlée et *directement sur la tubérosité tibiale antérieure* ; elle peut être décomposée en deux vecteurs : **Q5**, force de coaptation appliquant le tibia sous le fémur, et **Q6**, force efficace pour l'extension. La composante tangentielle **Q6**, la seule efficace sur l'extension, a donc nettement diminué, tandis que la composante centripète **Q5**, dite aussi *coaptatrice*, a augmenté.

Si maintenant nous comparons les forces efficaces dans les deux hypothèses **(Fig. 240 : schéma combiné)**, nous voyons que **Q4** est de 50 % plus grande que **Q6** : **la patella, en éloignant le tendon quadricipital comme un chevalet, accroît donc nettement l'efficacité du quadriceps**. Nous voyons aussi qu'en l'absence de patella la force de coaptation **Q5** s'est accrue, mais cet effet favorable est contrebalancé par la perte d'amplitude de flexion, due au raccourcissement de l'appareil extenseur, et par sa fragilisation. **La patella est donc fort utile**, ce qui explique la rareté et la **mauvaise réputation de la patellectomie**.

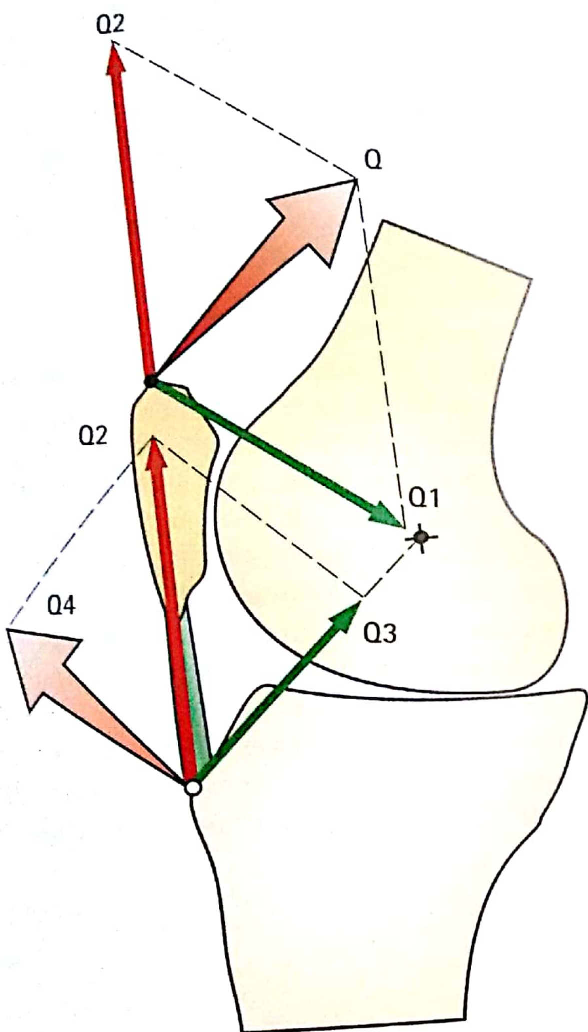


Fig. 238

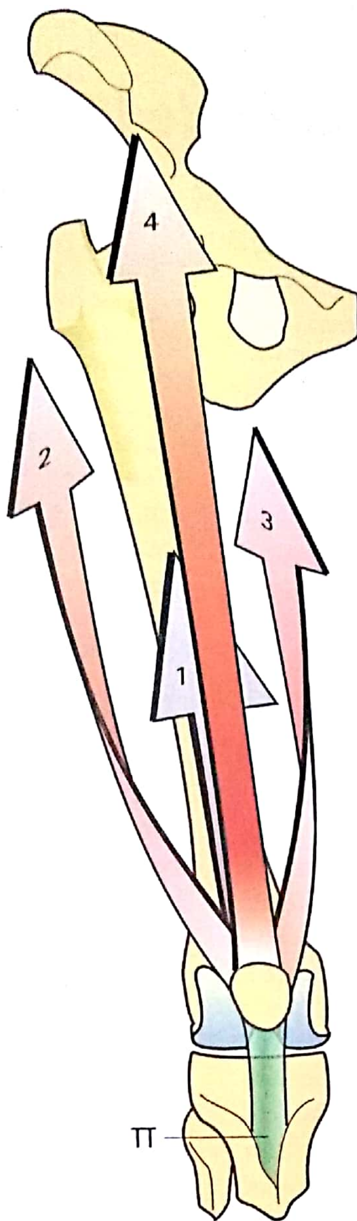


Fig. 237

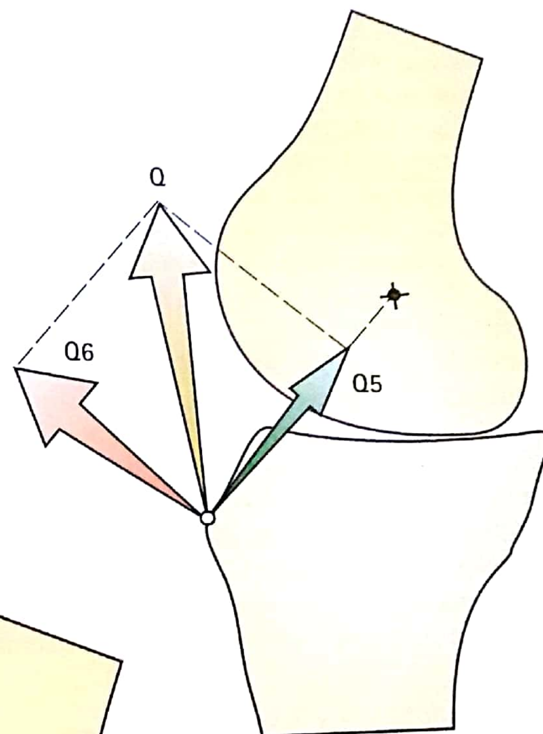


Fig. 239

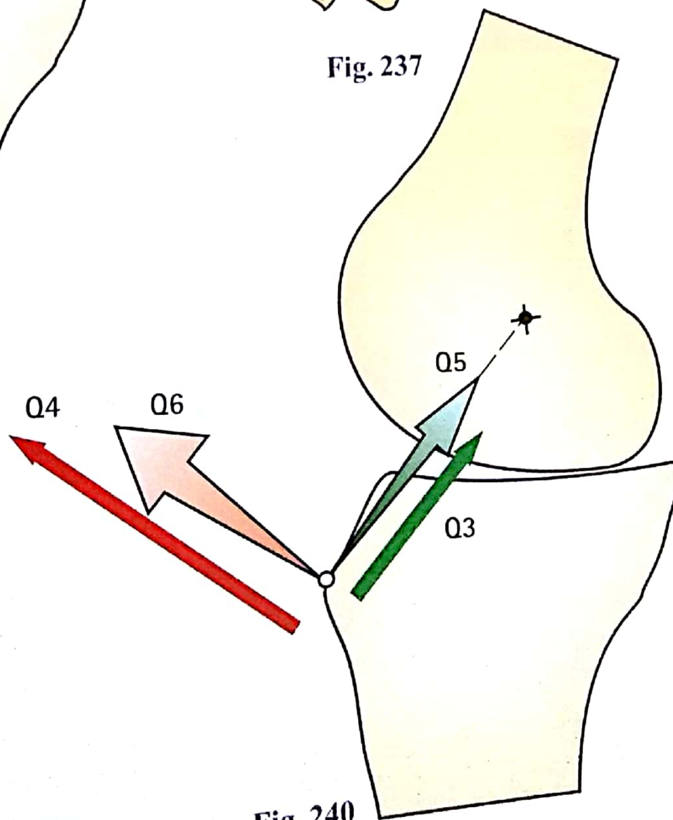


Fig. 240

Physiologie du muscle droit de la cuisse

Le **muscle droit de la cuisse** ne représente que le *cinquième de la force totale du quadriceps* et il ne suffit pas à lui seul pour obtenir l'extension complète, mais le fait qu'il soit un muscle bi-articulaire lui donne *une place à part*.

Grâce à son trajet devant l'axe de flexion-extension de la hanche et devant celui du genou, le muscle droit de la cuisse **(flèche rouge)** est à la fois fléchisseur de la hanche et extenseur du genou **(Fig. 241 : diagramme en trois positions)**. Mais son efficacité en tant qu'extenseur du genou dépend de la position de la hanche, et inversement son rôle de fléchisseur de la hanche est subordonné à la position du genou. Cela est dû au fait que la distance comprise entre l'épine iliaque antéro-supérieure a et le bord supérieur de la trochlée est plus courte **ac** en flexion **II** qu'en position **I** de rectitude **ab**. Cette différence de longueur e entraîne un allongement *relatif* du muscle lorsque la hanche est fléchie et le genou fléchit passivement sous le seul poids de la jambe II. Dans ces conditions, pour obtenir l'*extension du genou III*, les *trois autres chefs du quadriceps sont beaucoup plus efficaces* que le muscle droit de la cuisse qui est déjà détendu par la flexion de la hanche.

Si, par contre, la hanche passe de la position de rectitude **I** à l'extension **IV**, la distance entre les deux insertions du muscle droit de la cuisse augmente **ad** d'une longueur **f** qui tend ce muscle. Ce **raccourcissement relatif** augmente son efficacité d'autant. C'est ce qui se produit dans la course ou la marche lors de la détente du membre postérieur **(Fig. 245)** : sous l'**action des muscles fessiers**, la hanche est portée *en extension* tandis que genou et cheville s'étendent ; **le quadriceps possède alors sa puissance maximum** grâce à l'efficacité accrue du muscle droit de la cuisse. **Le muscle grand fessier est donc synergique-antagoniste du muscle droit de la cuisse** : antagoniste sur la hanche et synergique sur le genou.

Lors de l'avancée du membre oscillant pendant la période d'appui unilatéral de la marche **(Fig. 244)**, le muscle droit de la cuisse se contracte pour réaliser à la fois la flexion de la hanche et l'extension du genou. On voit donc que la position de ce muscle en tant que muscle bi-articulaire est **utile aux deux temps de la marche** : lors de l'impulsion motrice de la jambe postérieure et lors du lancement vers l'avant du membre oscillant.

Lors du **relèvement de la position accroupie**, le muscle droit de la cuisse joue un rôle important, car il est le seul des quatre chefs du quadriceps *qui ne perde pas son efficacité* au cours du mouvement. En effet, tandis que le genou s'étend, la hanche, sous l'action du muscle grand fessier, s'étend également, *ce qui retend le muscle droit de la cuisse* au niveau de son insertion supérieure, lui conservant ainsi pendant le début de l'action une longueur constante. Nous retrouvons là encore le rôle de **transfert de la force** d'un muscle puissant de la racine du membre, le muscle grand fessier, sur une articulation plus distale, le genou, par l'intermédiaire d'un muscle bi-articulaire, le muscle droit de la cuisse.

Enfin, inversement, **la flexion du genou sous l'action des muscles ischio-jambiers favorise la flexion de la hanche par le muscle droit de la cuisse**. Ceci est utile lors d'un saut, genoux fléchis **(Fig. 243)** : les muscles droits de la cuisse participent efficacement à la flexion des hanches. C'est encore un exemple de relation d'antagonisme-synergie entre les muscles ischio-jambiers, fléchisseurs du genou et extenseurs de la hanche, et le muscle droit de la cuisse, fléchisseur de la hanche et extenseur du genou.

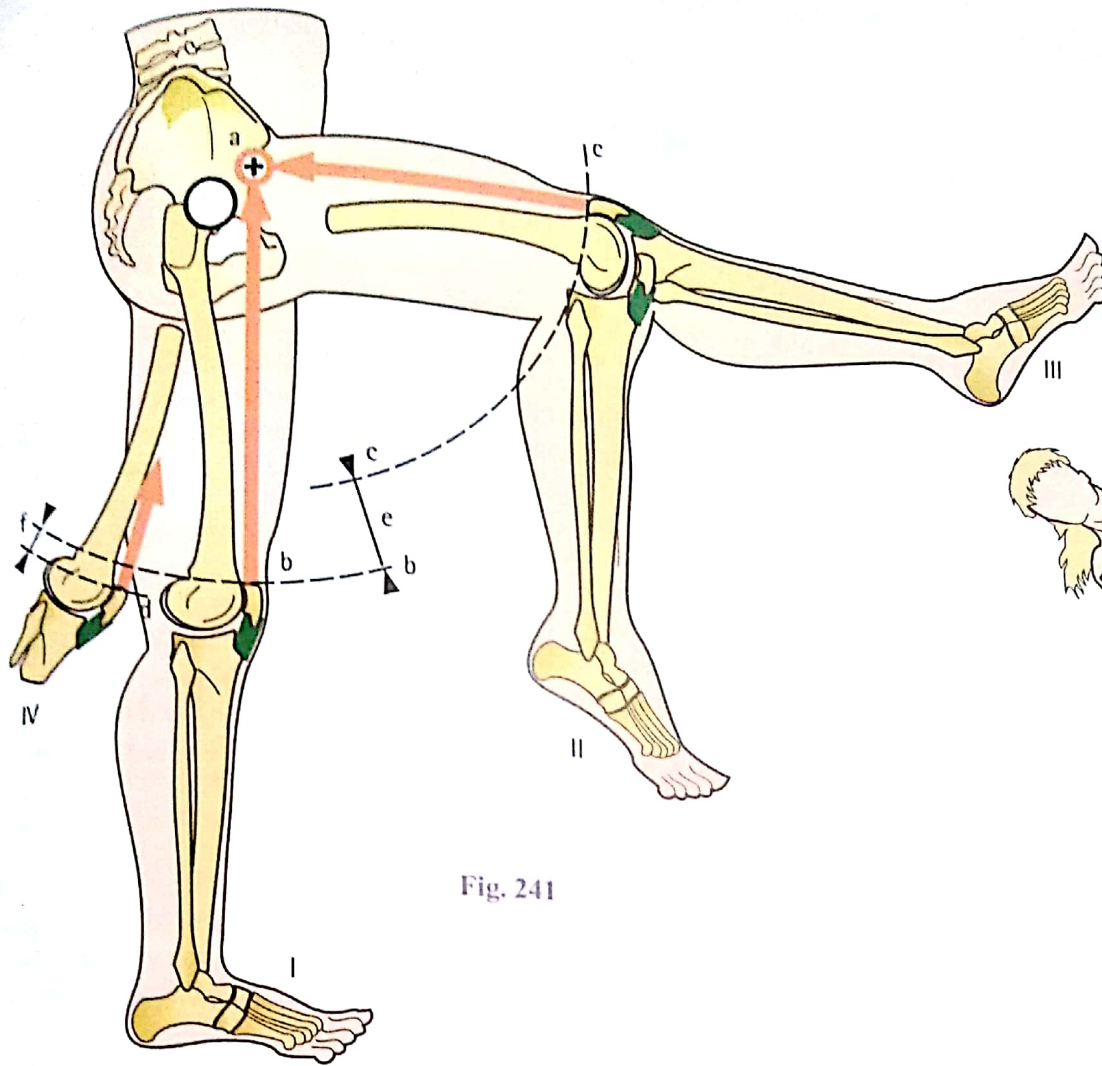


Fig. 241

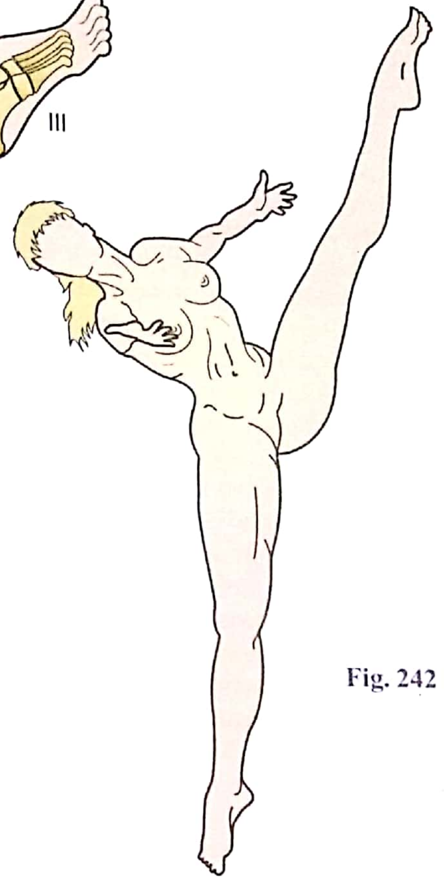
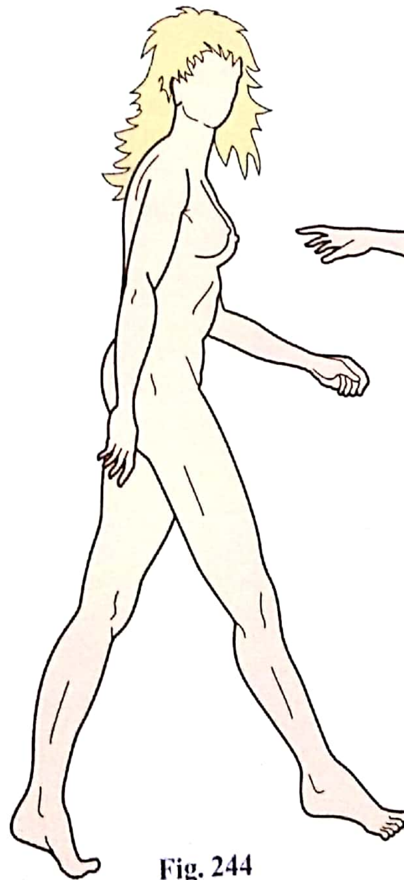
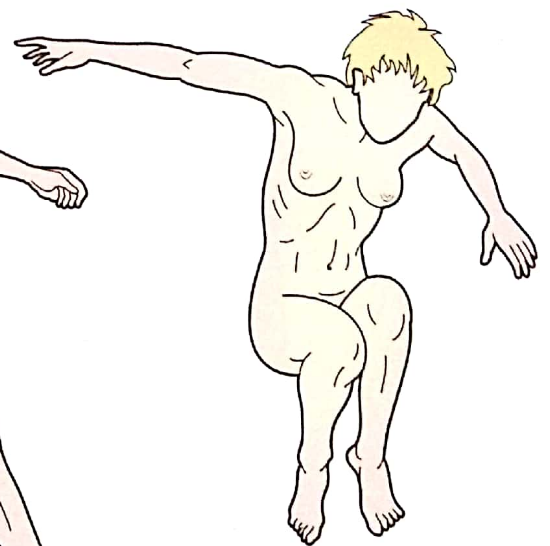


Fig. 242





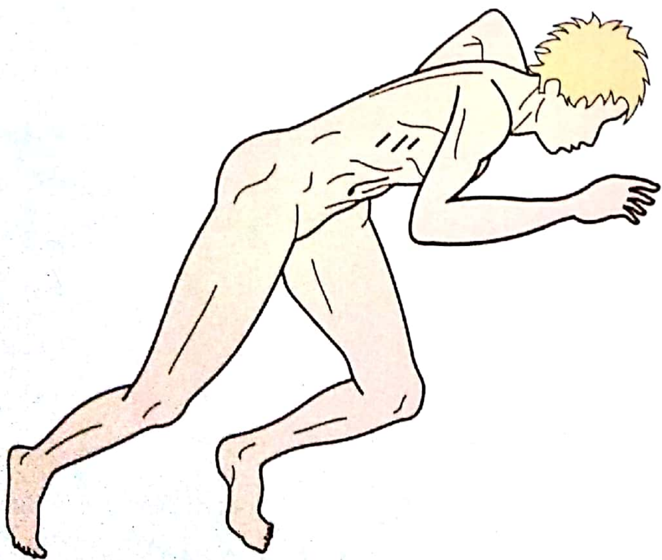


Fig. 245

Fig. 244

Fig. 243

Les muscles fléchisseurs du genou

Les muscles fléchisseurs du genou sont contenus *dans la loge postérieure de la cuisse* **(Fig. 246)**. Ce sont les **muscles ischio-jambiers** : **muscles biceps fémoral 1**, **semi-tendineux 2** et **semi-membraneux 3** ; les muscles dits de la « patte d'oie » : **muscles gracile 4**, **sartorius 5** et **semi-tendineux** (qui fait partie aussi des muscles ischio-jambiers) ; le **muscle poplité** (voir page suivante). Les **muscles gastrocnémiens latéral 6** et **médial 7** ne sont pratiquement pas fléchisseurs du genou, mais extenseurs de la cheville (voir p. 212).

Les muscles gastrocnémiens jouent cependant un rôle important dans la *stabilisation du genou* : s'insérant au-dessus des condyles, lorsqu'ils se contractent, lors du temps moteur du pas, c'est-à-dire quand genou et cheville s'étendent simultanément, ils repoussent les condyles vers l'avant ; ils sont ainsi **antagonistes-synergiques du quadriceps**.

Tous ces muscles sont bi-articulaires sauf deux d'entre eux, le muscle court biceps fémoral et le muscle poplité, qui sont mono-articulaires (voir page suivante). Les fléchisseurs bi-articulaires possèdent donc une action simultanée d'*extension de la hanche* et leur action sur le genou *dépend de la position de la hanche.*

Le **muscle sartorius 5** est fléchisseur, abducteur et rotateur externe de la hanche, en même temps que fléchisseur et rotateur interne du genou.

Le **muscle gracile 4** est surtout adducteur et accessoirement fléchisseur de la hanche, en même temps que fléchisseur du genou, dont il est aussi l'un des rotateurs internes (voir p. 148).

Les **muscles ischio-jambiers** sont à la fois *extenseurs de la hanche* (voir p. 44) et *fléchisseurs du genou*, et leur action sur le genou est conditionnée par la position de la hanche **(Fig. 247)**. Lorsque la hanche se fléchit, la distance **ab** qui sépare les insertions de ces muscles s'accroît régulièrement car le centre de la hanche **O**, autour duquel tourne le fémur, qui n'est pas confondu avec le point **a** autour duquel ils s'orientent. Ainsi, plus la hanche se fléchit, plus les muscles ischio-jambiers subissent un raccourcissement relatif et *plus ils sont tendus*. Lorsque la hanche est fléchie à 40° (position **II**), le raccourcissement relatif peut encore être compensé par la flexion passive du genou (**ab = ab'**), mais pour une flexion de 90° (position **III**), le raccourcissement relatif est tel que même si le genou est fléchi à angle droit il persiste encore un *raccourcissement relatif* important **f**. Si la flexion de la hanche dépasse 90° (position **IV**), il devient très difficile de conserver les genoux en extension complète **(Fig. 248)** : le raccourcissement relatif **g** est tout juste absorbé par l'élasticité des muscles, qui diminue notablement avec le manque d'exercice. La mise en tension des muscles ischio-jambiers par flexion de la hanche accroît l'efficacité de ces muscles en tant que fléchisseurs du genou lorsque, au cours d'une *escalade* **(Fig. 249)**, l'un des membres inférieurs se porte en avant, *la flexion de la hanche favorise la flexion du genou*. Inversement, *l'extension du genou favorise l'action d'extension de la hanche* par les muscles ischio-jambiers : c'est ce qui se produit lors des efforts de redressement du tronc à partir d'une position penchée en avant **(Fig. 248)**, et aussi lors de l'escalade, quand le membre inférieur qui était antérieur devient postérieur.

Si maintenant **(Fig. 247)** la hanche se porte en *extension complète* (position **V**), les muscles ischio-jambiers subissent un *allongement relatif* **e**, ce qui explique que la flexion du genou soit alors moins forte (voir Fig. 13). Cela souligne l'utilité des muscles mono-articulaires (poplité et court biceps) qui conservent la même efficacité quelle que soit la position de la hanche.

La puissance globale des fléchisseurs du genou est de 15 kgm, soit un peu plus du tiers de celle du quadriceps.

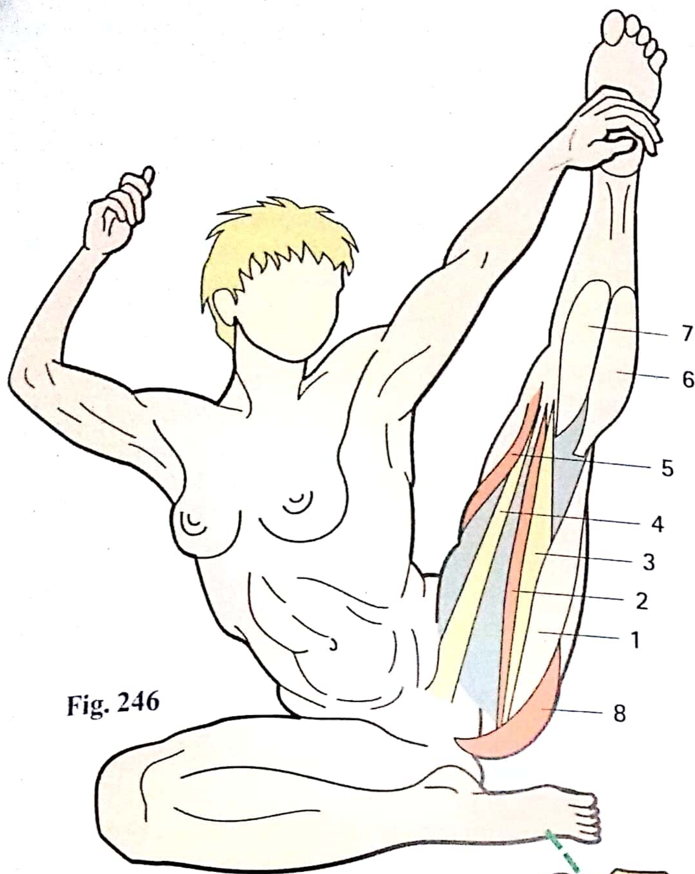


Fig. 246

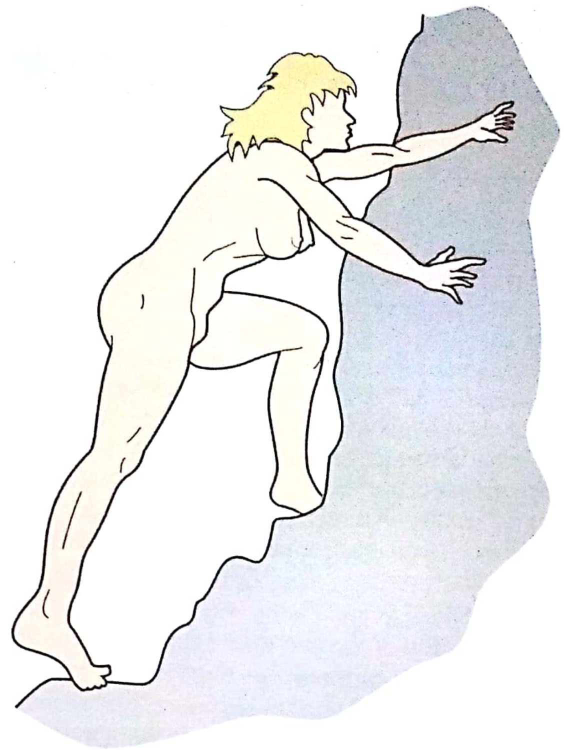
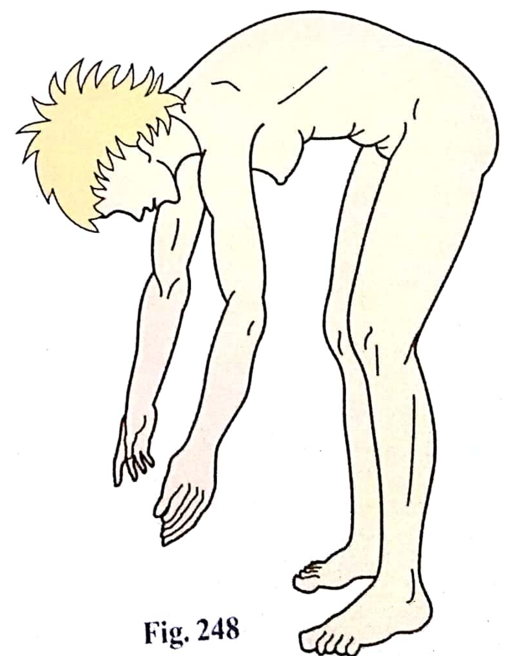

Fig. 249

Fig. 247


Fig. 248

Les muscles rotateurs du genou

Les muscles fléchisseurs du genou sont en même temps ses muscles rotateurs ; ils se répartissent en **deux groupes** suivant leur point d'insertion sur le squelette jambier **(Fig. 250 : vue postéro-interne du genou fléchi)**.

- Ceux qui se fixent en dehors de l'axe vertical **xx'** de rotation du genou. Ce sont les **muscles rotateurs externes RE**, représentés **(Fig. 253)** par les muscles **biceps fémoral 1** et **tenseur du fascia lata 2**. Lorsqu'ils tirent en arrière la partie externe de la surface articulaire proximale **(Fig. 251 : vue supérieure de la surface articulaire proximale)**, ils la font tourner de telle sorte que la pointe du pied se dirige *plus directement en dehors*. Le **muscle tenseur du fascia lata** ne devient fléchisseur-rotateur externe que lorsque le genou est fléchi ; sur un genou complètement étendu, il perd son action de rotation et devient extenseur : *il verrouille l'extension*. Le **muscle court biceps fémoral 1 (Fig. 254 : vue externe du genou fléchi)** est le *seul muscle rotateur externe mono-articulaire* ; la position de la hanche n'a donc aucun retentissement sur son action ;
- Ceux qui s'attachent en dedans de l'axe vertical **xx'** de rotation du genou : ce sont le **muscles rotateurs internes RI** représentés **(Fig. 253)** par les muscles **sartorius 3**, **semi-tendineux 4**, **semi-membraneux 5**, **gracile 6** et **poplité 7 (Fig. 254)**. Lorsqu'ils tirent en arrière la partie interne de la surface articulaire proximale **(Fig. 252 : vue supérieure de la surface articulaire proximale)**, ils la font tourner de telle sorte que la pointe du pied se dirige *en dedans*. Ils jouent le rôle de *freins de la rotation externe sur le genou en flexion*. Ils protègent ainsi les éléments capsulo-ligamentaires lorsqu'ils sont violemment sollicités au cours d'un virage brutal vers le côté opposé à la jambe d'appui. Le **muscle poplité 7 (Fig. 256, vue postérieure)** fait seul exception à cette disposition générale : il s'insère sur la face postérieure de l'extrémité du tibia, puis pénètre dans la capsule du genou en passant sous l'ogive que lui forme le ligament poplité arqué (voir aussi Fig. 161 p. 115). Auparavant, il a envoyé une expansion qui s'attache sur le bord postérieur du ménisque externe ; à l'intérieur de la capsule – mais *en dehors de la synoviale* – il glisse entre le ligament collatéral fibulaire et le ménisque latéral **(Fig. 254)** pour venir se fixer dans le fond d'une *fossette* occupant la partie basse de la face cutanée du condyle latéral. C'est le *seul muscle rotateur interne mono-articulaire* ; son action n'est donc pas influencée par la position de la hanche. Cette action se conçoit facilement sur une vue supérieure de la surface articulaire proximale **(Fig. 255)** : le muscle poplité **(flèche bleue)** tire la partie postérieure de la surface articulaire distale en arrière et en dehors.

Bien qu'étant situé en arrière de l'articulation, le muscle poplité est *extenseur du genou* : lors de la flexion, la fossette d'insertion du muscle poplité se déplace en haut et en avant **(Fig. 254)**, ce qui étire le muscle et renforce son action de rotateur interne. Inversement, lorsqu'il se contracte, le genou étant fléchi et, à plus forte raison, en rotation externe, il ramène la fossette en bas et en arrière, ce qui entraîne un *glissement du condyle externe dans le sens d'une extension*. Le **muscle poplité** est donc à la fois **extenseur et rotateur interne du genou**.

Globalement, le groupe des **muscles rotateurs internes est plus puissant** (2 kgm) que le groupe des muscles rotateurs externes (1,8 kgm) ; mais cette disproportion est faible.

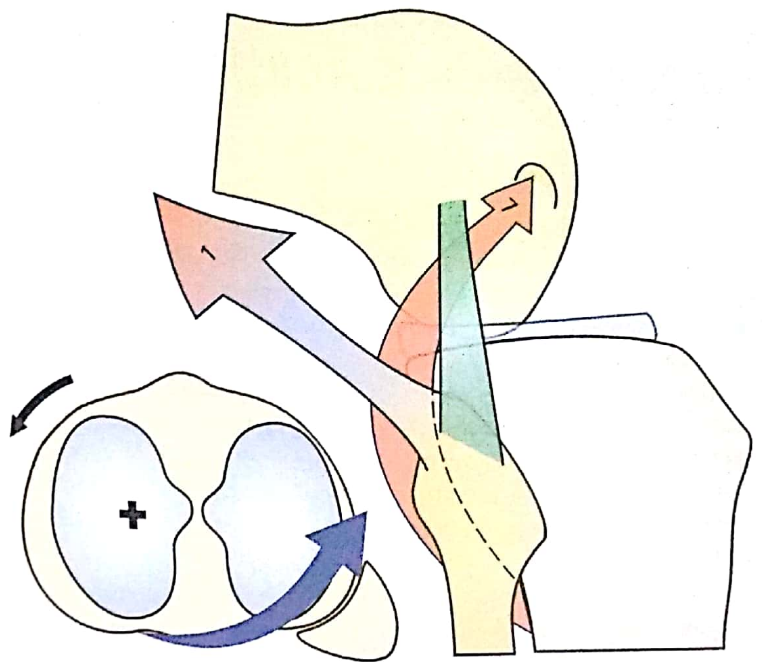


Fig. 255

Fig. 254

Fig. 253

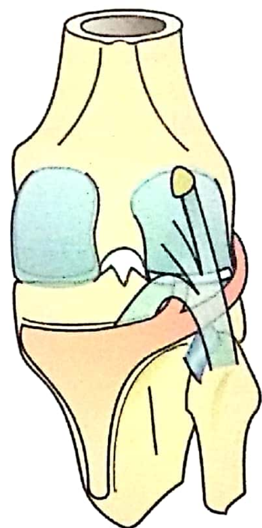


Fig. 256



Fig. 250

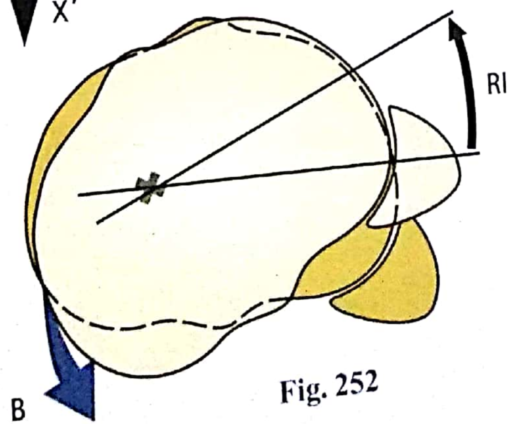


Fig. 252

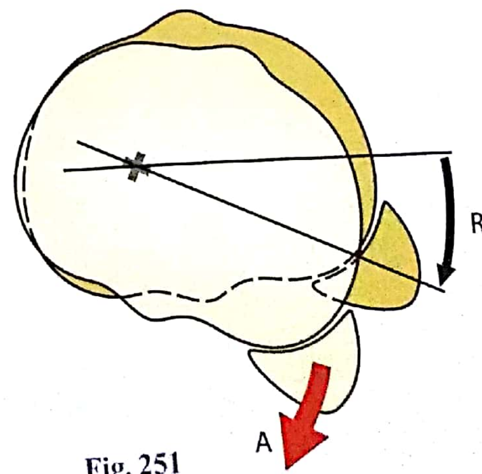


Fig. 251

La rotation automatique du genou

Nous avons déjà vu (p. 74) que la fin de l'extension s'accompagne d'une légère rotation externe et que le début de la flexion ne se fait pas sans une discrète rotation interne, et ceci *automatiquement*, sans qu'intervienne un acte volontaire.

Cette **rotation automatique** peut être mise en évidence sur une préparation anatomique grâce à l'expérience de Roud :

- sur le genou **en extension (Fig. 257 : vue supérieure du genou en extension)**, on place au préalable dans le plan frontal **deux broches parallèles et horizontales**, l'une dans l'extrémité supérieure du tibia, l'autre dans l'extrémité inférieure du fémur ;
- si l'on **fléchit le genou à 90° (Fig. 258 : vue supérieure du genou fléchi)**, on constate que les deux broches ne sont plus parallèles du fait de la rotation externe du fémur sur le tibia : elles forment un angle de 30° ;
- ceci devient évident lorsqu'on replace l'**axe du fémur dans une direction sagittale (Fig. 259)**. On constate alors que la broche tibiale est maintenant orientée de dedans en dehors et d'arrière en avant, ce qui indique une **rotation interne du tibia** sous le fémur et forme un **angle de 20°** avec la perpendiculaire à l'axe du fémur. La flexion du genou s'accompagne donc d'une **rotation interne automatique** de **20°**. La différence de 10° provient du fait que la broche fémorale, du fait du valgus physiologique du genou, n'est pas perpendiculaire à l'axe diaphysaire mais forme avec lui un angle **V** de 80° (voir **Fig. 3 p. 69**) ;
- on peut faire cette expérience *en sens inverse* : partant de la position de flexion à angle droit, pour laquelle les broches divergent **(Fig. 258)**, pour aboutir à l'extension complète pour laquelle elles sont parallèles **(Fig. 257)**, on met ainsi en évidence une **rotation externe automatique lors de l'extension du genou**.

C'est parce que *le condyle latéral recule plus que le médial* lors de la flexion du genou **(Fig. 260 : vue supérieure de la surface articulaire proximale)** qu'apparaît une rotation interne du tibia : sur le genou en extension les points de contact **a** et **b** sont alignés sur une transversale **Ox** ; la flexion fait reculer le condyle interne de **a** en **a'** (5-6 mm) et le condyle médial de **b** en **b'** (10-12 mm). Les points de contact **a'** et **b'** correspondant à la flexion sont alignés sur **Oy** qui forme avec **Ox** un angle **xOy** de **20°**. Cette trajectoire différente des deux condyles sur les glènes est donc la cause de la rotation externe de 20° du tibia en extension.

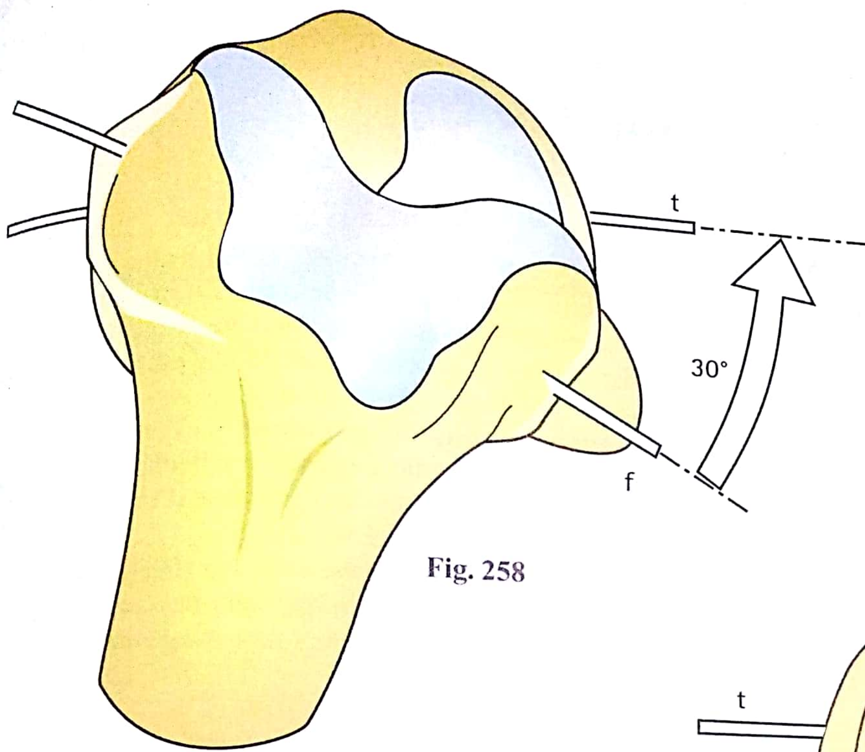


Fig. 258

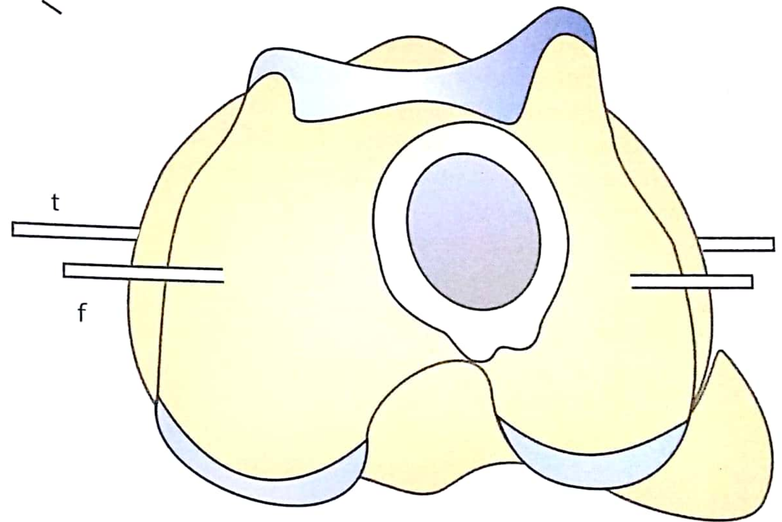


Fig. 257

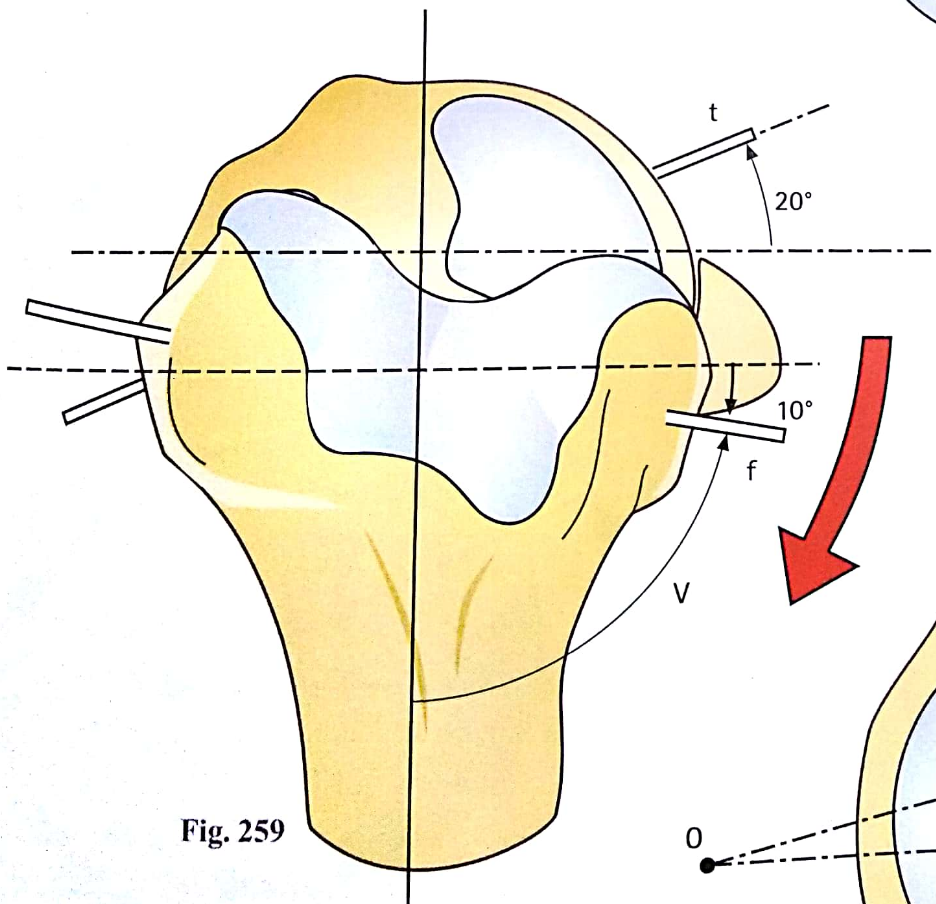


Fig. 259

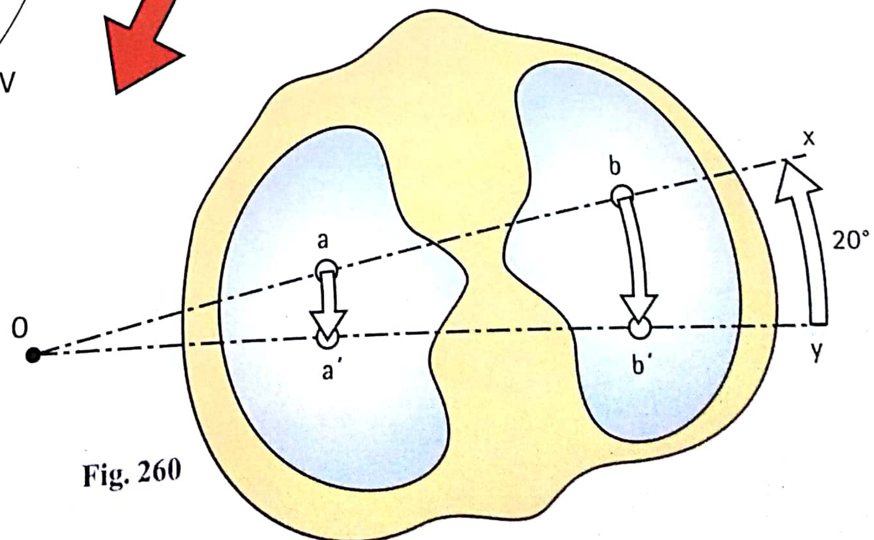


Fig. 260

La rotation automatique du genou *(suite)*

Ce recul différentiel des condyles est dû à **trois facteurs.**

- L'**inégalité de développement des contours condylaires (Fig. 261 et 262)**. Lorsqu'on développe les surfaces articulaires du condyle médial **(Fig. 261)** et qu'on les compare avec le développement des surfaces du condyle latéral **(Fig. 262)**, on constate que le développement **bd'** de la courbe postérieure du condyle latéral est nettement plus grand que celui du condyle médial si l'on pose **ac' = bc'**. Cela explique, en partie, que le *condyle latéral roule plus que le condyle médial*.
- La **forme des glènes** : le condyle médial recule peu car il est contenu dans une *glène concave* **(Fig. 263)**, tandis que le condyle latéral glisse sur le versant postérieur de la glène externe convexe **(Fig. 264)**.
- L'**orientation des ligaments collatéraux** : lorsque les condyles reculent sur les glènes, le ligament collatéral médial se tend plus rapidement **(Fig. 263)** que le latéral **(Fig. 264)** ; ce dernier laisse au condyle latéral une plus grande latitude de recul du fait de son obliquité.

Il existe aussi des **couples de rotation** :

- l'action prédominante des muscles fléchisseurs-rotateurs internes **(Fig. 265)**, muscles de la patte d'oie **(flèche bleue)** et muscle poplité **(flèche verte)** ;
- la tension du ligament croisé antérieur **(flèche jaune)** en fin d'extension **(Fig. 266)** : le ligament passant en dehors de l'axe, sa tension entraîne une rotation externe.

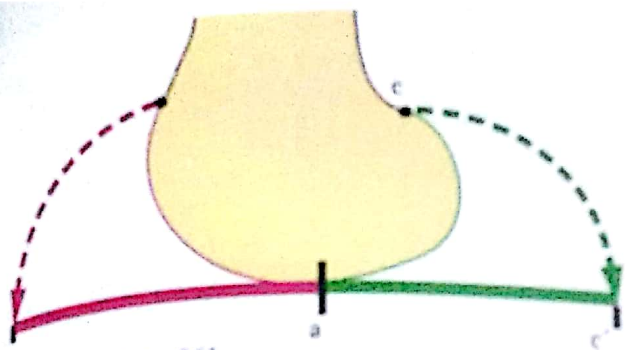


Fig. 261

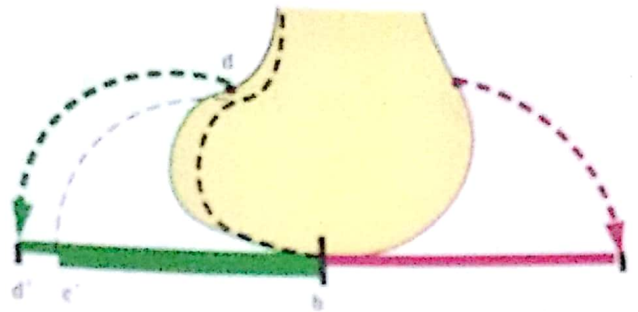
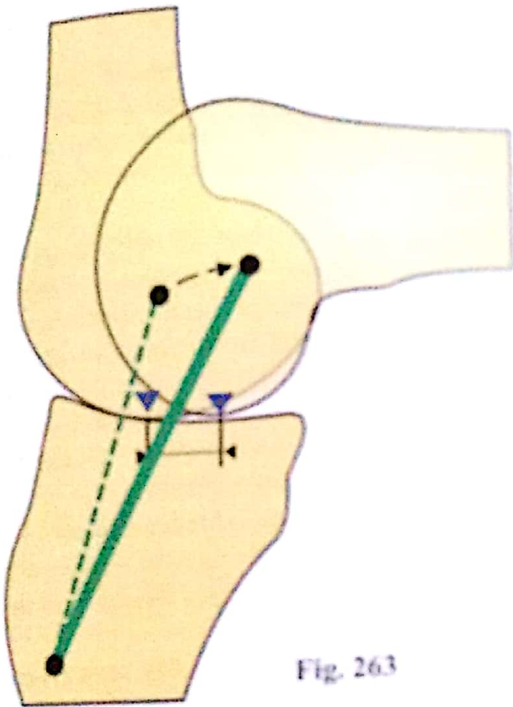
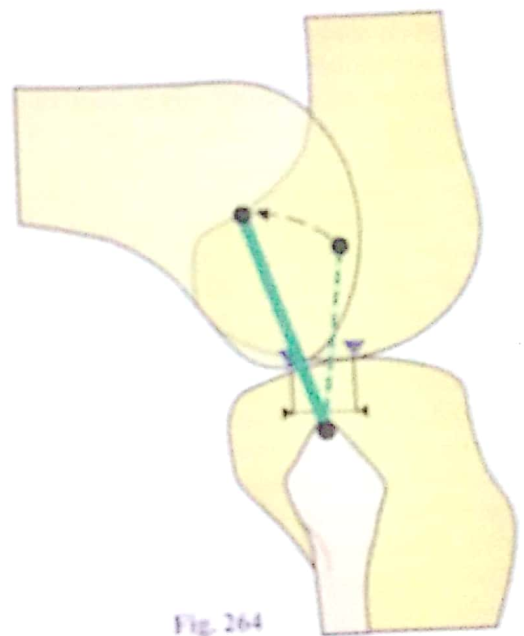


Fig. 262


Fig. 263


Fig. 264

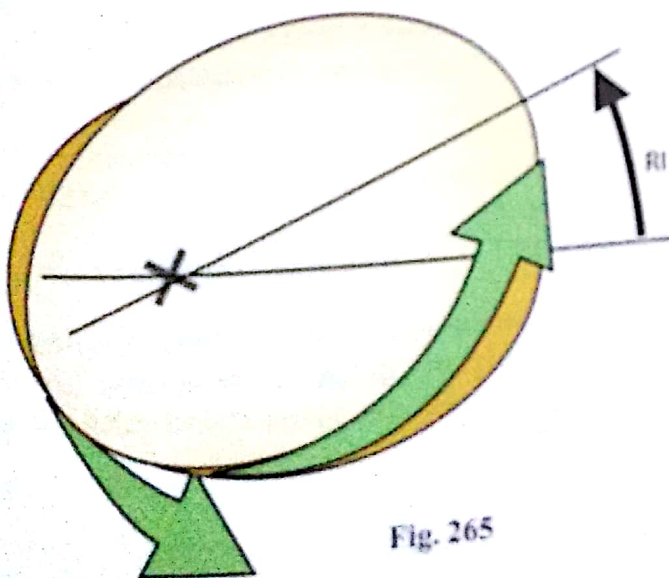


Fig. 265

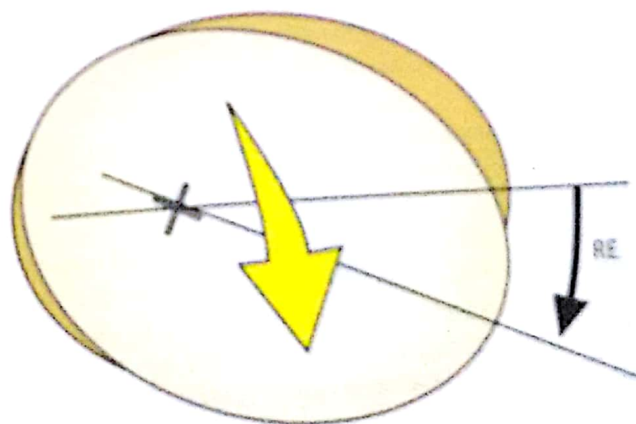


Fig. 266

L'équilibre dynamique du genou

Au terme de ce chapitre, il apparaît que la stabilité du genou, articulation faiblement emboîtée, tient du **miracle permanent**. C'est pourquoi nous avons voulu tenter de donner dans un **schéma synoptique (Fig. 267)** les principaux tests en correspondance avec les structures auxquelles ils répondent. Le choix de ces tests peut prêter à discussion, de même que leur interprétation qui s'appuie cependant sur les écrits des plus récents. De toute façon, nous avons conscience qu'il s'agit là d'une *classification toute provisoire*.

- Le **tiroir antérieur en rotation nulle 1**, ou tiroir direct, peut exister à un faible degré de façon physiologique ; il faut donc toujours comparer avec le côté supposé sain. Il peut cependant, lorsqu'il est nettement positif, révéler une *rupture du ligament croisé antérieur*. Quand il est très marqué, une *rupture du ligament collatéral tibial est associée* à celle du ligament croisé antérieur. Attention cependant à un *faux tiroir antérieur* qui n'est que la *réduction d'une subluxation postérieure* spontanée due à une rupture du ligament croisé postérieur… !
- Le **tiroir antérieur en rotation interne à 15° 2** constitue un signe de certitude de *rupture du ligament croisé antérieur* qui peut être associée à une lésion de la nappe fibrotendineuse postéro-externe.
- Le **tiroir antérieur en rotation interne à 30° 3** traduit une *rupture du ligament croisé antérieur associée à celle du ligament croisé postérieur*, et, lorsqu'on perçoit un ressaut, à une *désinsertion associée de la corne postérieure du ménisque latéral*.
- Le **ressaut externe en valgus, rotation interne et flexion 4**, ou *Lateral Pivot Shift de MacIntosh* et le *Jerk Test de Hughston*, sont des témoins sûrs de la *rupture du ligament croisé antérieur*.
- Le **tiroir antérieur en rotation externe 5**, lorsqu'il est modérément positif, indique une lésion de la nappe fibrotendineuse postéro-externe, et si l'on perçoit un ressaut, une *désinsertion associée de la corne postérieure du ménisque médial*.
- Le **tiroir postérieur en rotation nulle 6**, ou *tiroir postérieur direct*, est le signe sûr de la *rupture du ligament croisé postérieur*.
- Le **ressaut externe en valgus, rotation externe et extension 7**, ou *Pivot Shift Reverse Test*, ainsi que le **ressaut externe en valgus, rotation externe et flexion**, indiquent une rupture du ligament croisé postérieur.
- Le **tiroir postérieur en rotation externe 8** traduit une lésion de la nappe fibrotendineuse postéro-externe pouvant être associée à une *rupture du ligament croisé postérieur*.
- Le **tiroir postérieur en rotation interne 9** serait un signe spécifique de la *rupture du ligament croisé postérieur associée à une lésion de la nappe fibrotendineuse postéro-interne*.
- Une **latéralité externe en extension 10** créant un valgus discret positif correspond à une *rupture du ligament collatéral tibial* ; lorsque le valgus est plus marqué (++), il rend compte d'une lésion associée de la *coque condylienne interne* ; enfin, lorsqu'il est très marqué (+++), il existe *en plus une rupture du ligament croisé antérieur*.
- Une **latéralité externe en légère flexion 10-30° 11** indique une *rupture associée du ligament collatéral tibial, de la coque condylienne interne* et de la *nappe fibrotendineuse postéro-interne* ainsi qu'une lésion de la *corne postérieure du ménisque latéral*.
- Une **latéralité interne en extension 12** indique, lorsque le varus est modérément positif, une *rupture du ligament collatéral fibulaire* associée ou non à une *rupture du tractus ilio-tibial ou ancienne bandelette de Maissiat*, et lorsqu'il est marqué ++ une *rupture associée de la coque condylienne externe* et de la *nappe fibrotendineuse postéro-externe*.
- Une **latéralité interne en légère flexion 10-30° 13** traduit les mêmes lésions mais *sans la rupture du tractus ilio-tibial*.
- Le **test de recurvatum, rotation externe, valgus 14**, ou encore *test de suspension par l'hallux*, sont le signe d'une *rupture associée du ligament collatéral fibulaire et de la nappe fibrotendineuse postéro-externe*.

Pour comprendre la mécanique du genou, il faut concevoir que le genou en fonctionnement réalise un **équilibre dynamique** et surtout abandonner l'idée d'un équilibre à deux termes, comme celui figuré par les deux plateaux d'une balance. Par contre, l'image d'une planche à voile **(Fig. 268)** est bien meilleure, car elle correspond à un **équilibre à trois termes** :

- la mer, qui soutient la planche, correspond à l'action des *surfaces articulaires* ;
- l'homme, qui conduit le mouvement par ses *réactions permanentes en fonction du vent et de la mer*, correspond au système musculaire ;
- la voile, qui reçoit la force du vent, correspond au *système ligamentaire*.

À tout instant, le fonctionnement du genou est déterminé par les **réactions mutuelles et équilibrées de ces trois facteurs** : surfaces articulaires, muscles et ligaments en **équilibre dynamique tri-factoriel**.

3 TA. Ri.30

2 TA. Ri.15

1 TA.Dir R.0

4 RsE. VI.Ri.Fl.
PivotShift – Jerk Test

5 TA.Re

±

0

12 Lat.In.Ext.

10 Lat.Ex.Ext.

P.A.P.I.

P.A.P.E.

11 Lat.Ex.Re.Fl30

13 Lat.In.Re.Fl30

TP. Ri 9

8 TP. Re

14 Suspension Go
Valgus-Recurvatum-Re

TP.Dir R.0 6

7 RsE. VI.Re.Ex.
PivotShift Reverse Test

Fig. 267

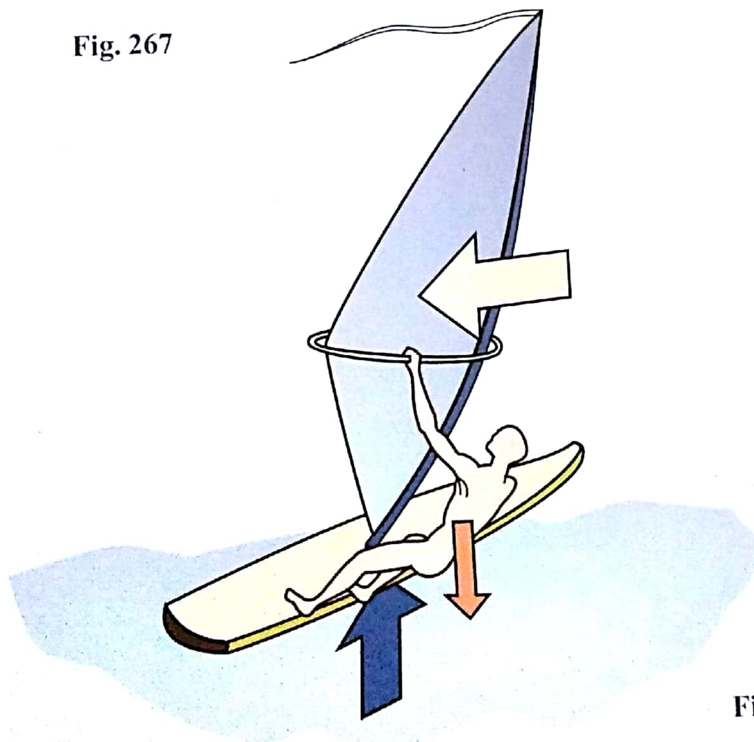


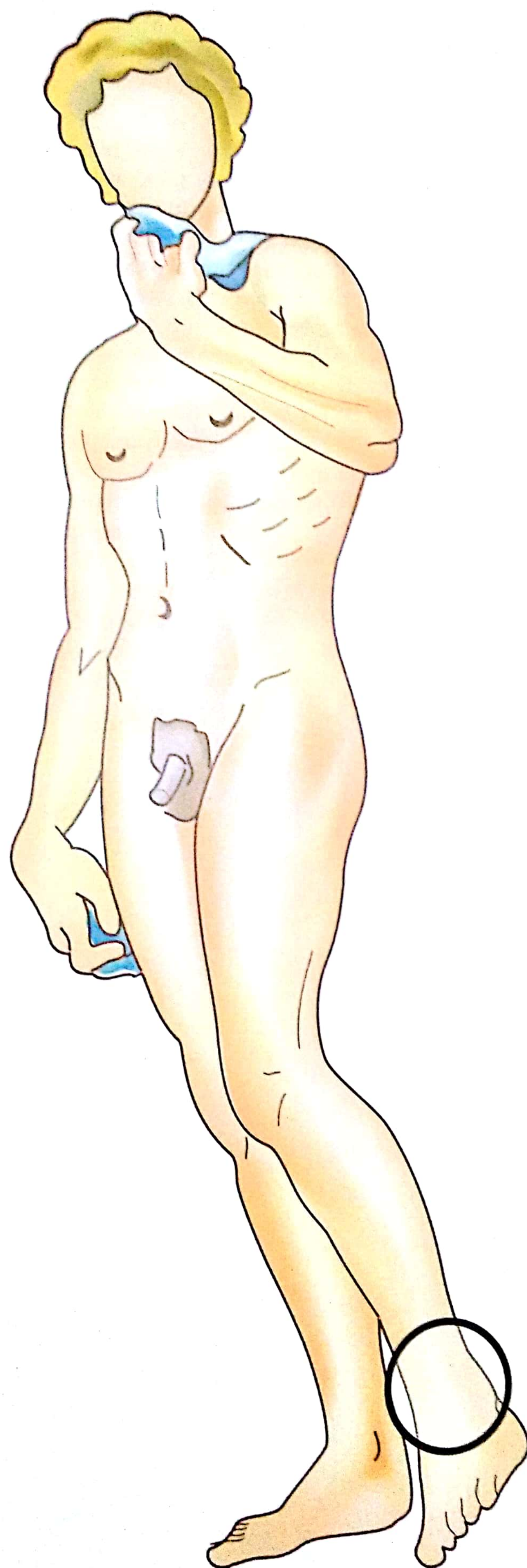
Fig. 268

Chapitre 3

LA CHEVILLE

L'articulation de la cheville, ou articulation talo-crurale, est l'articulation distale du membre inférieur. C'est une articulation trochléaire : elle ne possède donc qu'un seul degré de liberté. Elle conditionne les mouvements de la jambe par rapport au pied dans le plan sagittal. Elle est nécessaire sinon indispensable à la marche, que ce soit en terrain plat ou en terrain accidenté.

C'est une articulation très « serrée », très emboîtée, qui subit des contraintes extrêmement importantes, puisqu'en appui monopode, elle supporte la totalité du poids du corps encore augmenté par l'énergie cinétique lorsque le pied prend contact avec le sol avec une certaine vitesse lors de la marche, de la course ou de la réception d'un saut. Il est donc facile d'imaginer les problèmes à résoudre pour réaliser des prothèses totales talo-crurales de longévité garantie.



Le complexe articulaire du pied

En réalité, l'articulation talo-crurale n'est que la plus importante – « **la reine** » comme disait Farabeuf – de tout le **complexe articulaire de l'arrière-pied.** Cet ensemble d'articulations, aidé de la rotation axiale du genou, réalise l'équivalent d'une seule articulation à trois degrés de liberté qui permet d'**orienter la voûte plantaire** dans toutes les directions pour l'adapter aux accidents du terrain. On retrouve ici l'*homologie avec le membre supérieur* où les articulations du poignet, aidées de la prono-supination, permettent l'orientation de la main dans tous les plans. Cependant, l'*amplitude de cette orientation est bien plus limitée au pied qu'à la main.*

Les **trois axes principaux** de ce complexe articulaire **(Fig. 1)** se coupent approximativement au niveau de l'arrière-pied. Lorsque le pied est en position de référence, ces trois axes sont perpendiculaires entre eux ; sur cette figure, l'extension de la cheville modifie l'orientation de l'axe **Z**, alors que les deux autres axes sont fixes.

L'**axe transversal** **XX'** passe par les deux malléoles et correspond à l'**axe de l'articulation talo-crurale**. Il est compris en gros dans le plan frontal et autorise les mouvements de **flexion-extension** du pied (voir p. 160) qui s'effectuent dans un *plan sagittal*.

L'**axe longitudinal de la jambe** **Y** est vertical et conditionne les mouvements d'**adduction-abduction** du pied par rapport à la jambe, qui s'effectuent dans un plan transversal. Nous avons vu (p. 74) que ces mouvements sont possibles grâce à la rotation axiale du genou fléchi. Dans une plus faible mesure, ces mouvements d'adduction-abduction relèvent des articulations du *tarse postérieur*, mais alors ils sont toujours combinés à des mouvements autour du troisième axe.

L'**axe longitudinal** du pied **Z** est horizontal et contenu dans un *plan sagittal*. Il conditionne l'orientation de la plante du pied, lui permettant de s'orienter soit directement vers le bas, soit en dehors, soit en dedans. Par analogie avec le membre supérieur, on appelle ces mouvements respectivement **pronation** et **supination**.

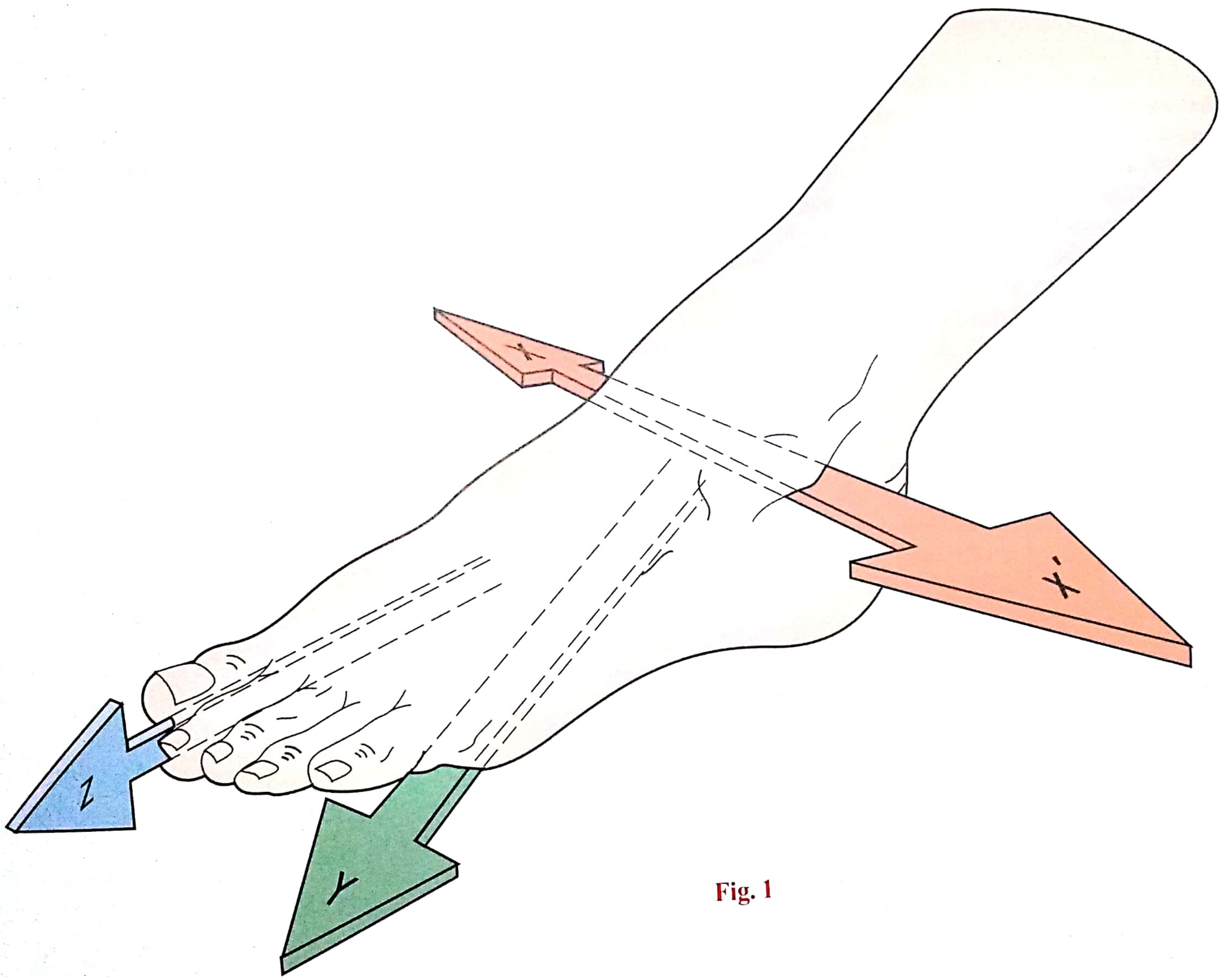


Fig. 1

La flexion-extension

La **position de référence (Fig. 2)** est réalisée lorsque le plan de la plante du pied est *perpendiculaire* à l'axe de la jambe **A**. À partir de cette position, la **flexion de la cheville B** se définit comme le mouvement qui *rapproche le dos du pied de la face antérieure de la jambe* ; on l'appelle encore la flexion dorsale ou dorsi-flexion, mais il s'agit là d'une redondance.

Inversement, l'**extension de l'articulation talo-crurale C** éloigne le dos du pied de la face antérieure de la jambe, tandis que le pied tend à se placer *dans le prolongement de la jambe*. On appelle encore ce mouvement la flexion plantaire. Cependant, **cette dénomination est impropre**, car la flexion correspond toujours à un mouvement qui ramène proximalement les segments de membre vers le tronc. De plus, il ne serait pas logique que des muscles extenseurs réalisent une flexion… Le terme de flexion plantaire doit donc être prohibé.

Sur cette figure, on constate que *l'amplitude de l'extension est nettement plus grande que celle de la flexion*. Pour mesurer ces angles, plutôt que de se référer au centre de l'articulation talo-crurale, il est plus commode d'apprécier l'**angle formé par la plante du pied avec l'axe de la jambe (Fig. 3)** :

- lorsque cet *angle est aigu* **b**, il s'agit d'une **flexion**. Son amplitude est de 20 à 30°. La zone rosée indique la marge des variations individuelles d'amplitude, soit 10° ;
- lorsque cet *angle est obtus* **c**, on reconnaît l'**extension**. Son amplitude est de 30 à 50°. La marge des variations individuelles (zone bleutée) est plus grande (20°) que pour la flexion.

Lors des mouvements extrêmes, l'articulation talo-crurale n'est pas la seule à intervenir : il s'y ajoute l'**amplitude propre des articulations du tarse** qui, pour être moins importante, n'en est pas pour autant négligeable.

- Dans la **flexion extrême (Fig. 4)**, les articulations du tarse ajoutent quelques degrés +, tandis que la voûte s'aplatit.
- Inversement, dans l'**extension extrême (Fig. 5)**, l'amplitude supplémentaire + provient d'un creusement de la voûte.

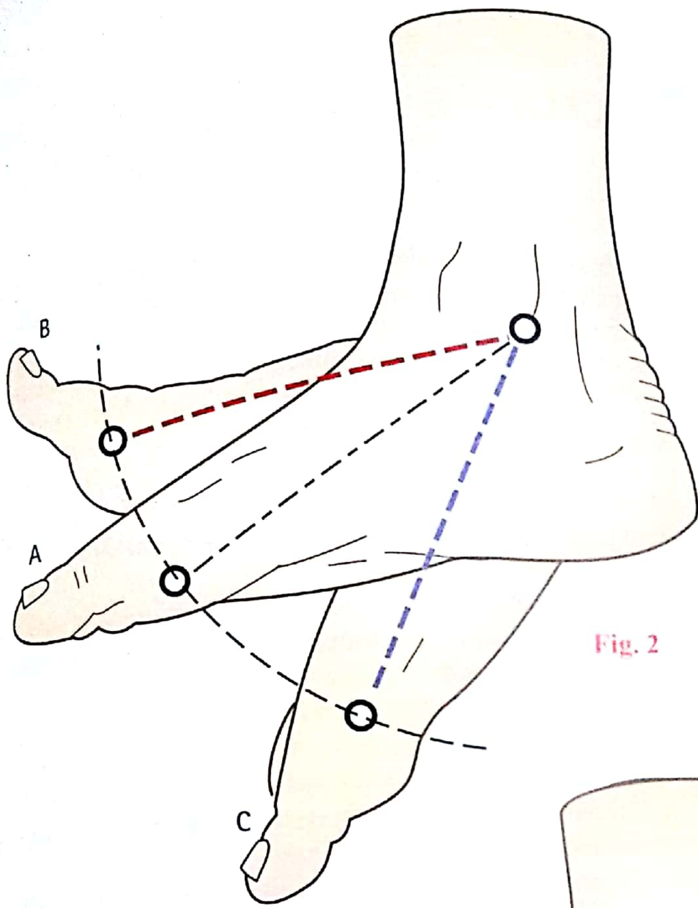


Fig. 2

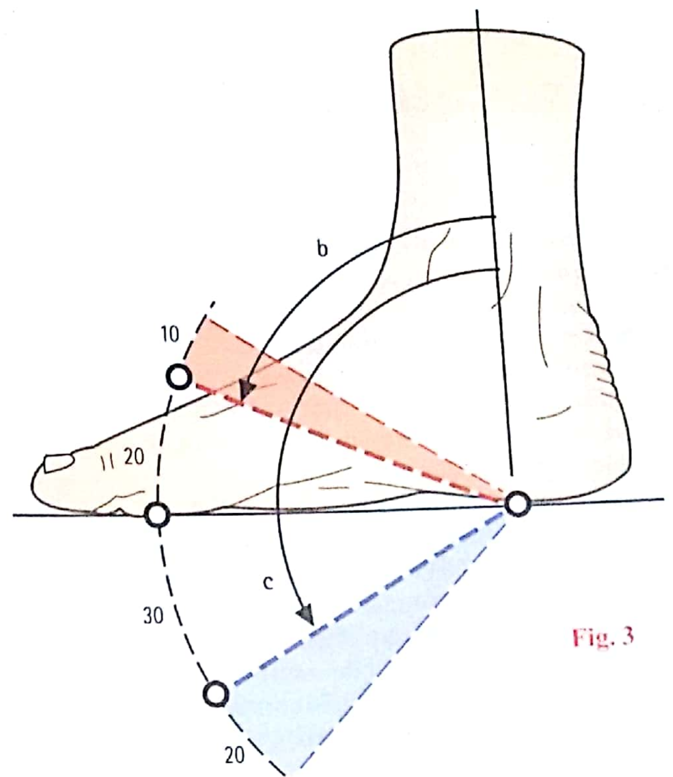


Fig. 3

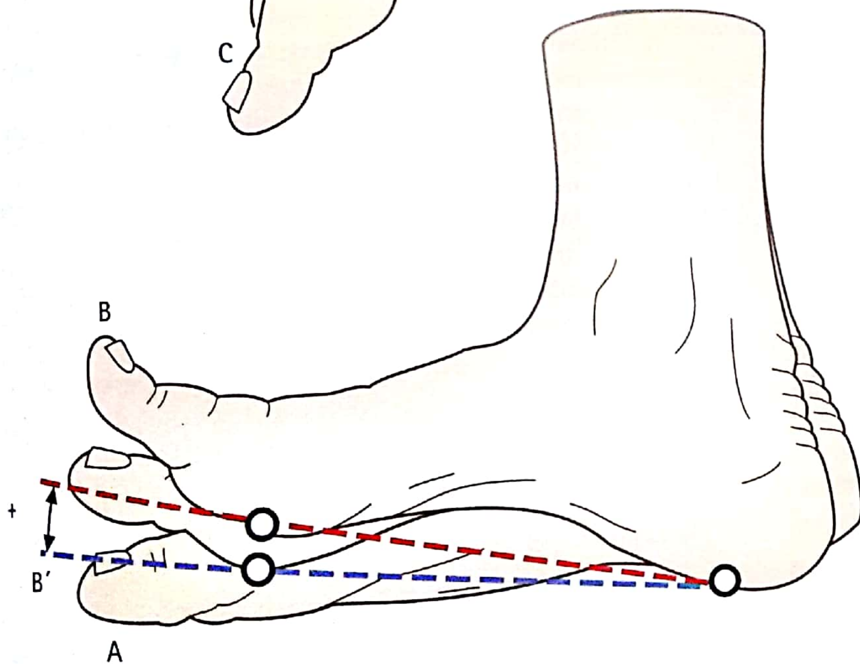


Fig. 4

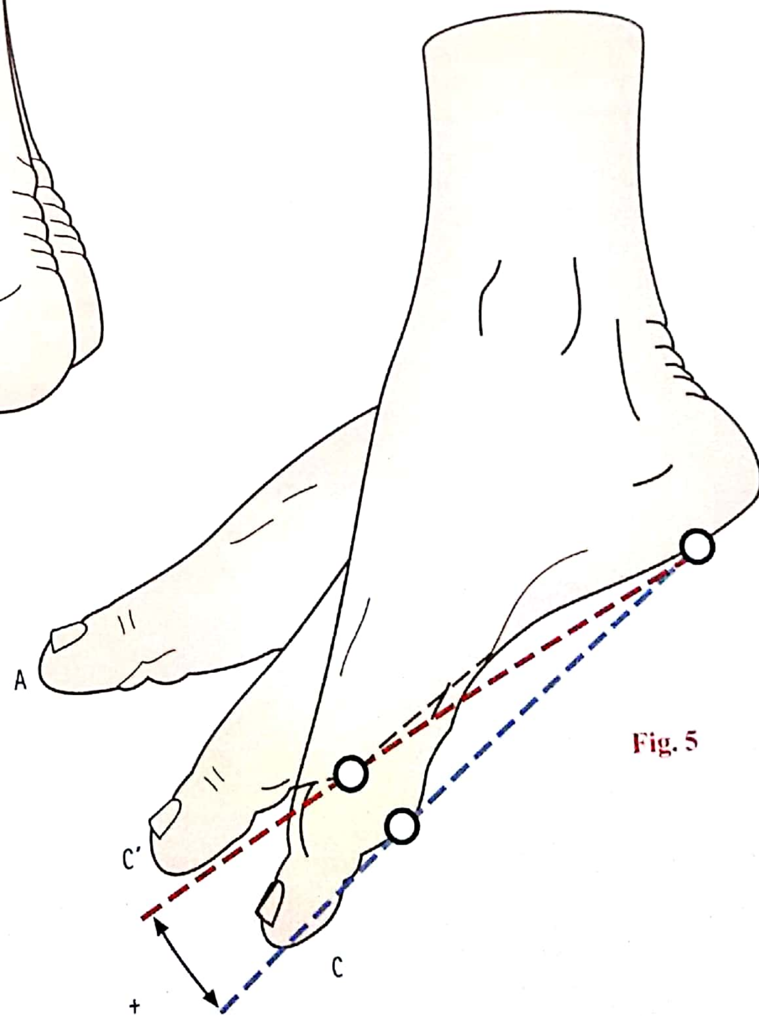


Fig. 5

Les surfaces de l'articulation talo-crurale

Si l'on veut comparer l'articulation talo-crurale à un **modèle mécanique** (Fig. 6), on peut la décrire ainsi :

- une *pièce inférieure* A, le talus, supporte une surface cylindrique, à grand axe transversal XX' ;
- une *pièce supérieure* B, l'extrémité inférieure du tibia et de la fibula, forme un bloc – supposé ici transparent – dont la face inférieure est creusée d'un segment de cylindre identique au précédent.

Le *cylindre plein, encastré dans le segment de cylindre creux*, maintenu latéralement entre les deux flancs de la pièce supérieure, peut effectuer des mouvements de flexion **(flèche bleue)** et d'extension **(flèche rouge)** autour de l'axe commun XX'.

Dans la **réalité anatomique (Fig. 7 : vue antéro-interne de l'articulation talo-crurale « démontée » et Fig. 8 : *idem*, vue postéro-externe)**, le cylindre plein correspond à la **trochlée du talus**. Celle-ci comporte trois parties : une *face supérieure* et deux faces latérales, *les joues*.

- La **face supérieure**, poulie proprement dite, convexe d'avant en arrière, est marquée longitudinalement par une dépression axiale, la gorge de la trochlée **1**, vers laquelle convergent le versant interne **2** et le versant externe **3** de la trochlée. De chaque coté se situent les joues de la trochlée.
- La **joue interne** 7 est pratiquement plane – sauf en avant où elle est déjetée en dedans. Elle est séparée du versant interne **3** de la trochlée par une arête aiguë **11**.

Elle entre en contact avec la facette articulaire **8** de la face externe de la **malléole médiale** 9, recouverte d'un cartilage qui continue celui de la face inférieure du pilon tibia **10**.

- La **joue externe** 12 est fortement déjetée en dehors **(Fig. 8)**, concave de haut en bas (Fig. 11 p. 165) et aussi d'avant en arrière (Fig. 9 p. 165). Son « plan » est légèrement oblique en avant et en dehors. Elle entre en contact avec la facette articulaire **13** de la face interne (Fig. 7) de la **malléole latérale** 14. Cette facette est séparée de la surface tibiale par l'interligne tibio-fibulaire distal **15**, comblé par une frange synoviale **16** (voir p. 165), en contact avec l'arête 17 qui sépare le versant et la joue externes de la trochlée. Cette arête est *chanfreinée en avant* **18** et *en arrière* **19** (voir Fig. 12, p. 165). Cette articulation, de type syndesmose, est maintenue par le ligament tibio-fibulaire antérieur 27 et le ligament tibio-fibulaire postérieur **28**.

Cette surface trochléaire de la trochlée du talus correspond à une **surface inversement conformée, située à la face inférieure du pilon tibia (Fig. 7 et 8)** : concave d'avant en arrière (Fig. 12 p. 165 : coupe sagittale, vue externe), elle présente une crête mousse sagittale **4** qui s'encastre dans la gorge de la trochlée **(Fig. 11 : coupe frontale, vue antérieure)**. De chaque côté, une **gouttière interne 5** et une **gouttière externe 6** reçoivent le versant correspondant de la trochlée.

Cette surface est limitée en arrière par un rebord **20** que l'on appelle parfois la *troisième malléole* de Destot.

Les **ligaments externes de l'articulation talo-crurale** sont visibles sur la vue antéro-interne **(Fig. 7)** :

- le ligament talo-fibulaire antérieur **21** ;
- le ligament calcanéo-fibulaire externe **22** ;
- le ligament talo-fibulaire postérieur **23**.

Les **ligaments internes de l'articulation talo-crurale** sont visibles sur la vue postéro-externe **(Fig. 8)**, disposés en deux nappes, la nappe profonde et la nappe superficielle :

- le ligament talo-fibulaire postérieur profond **24** ;
- le ligament talo-fibulaire antérieur profond **25** ;
- la nappe superficielle du ligament deltoïde **26**.

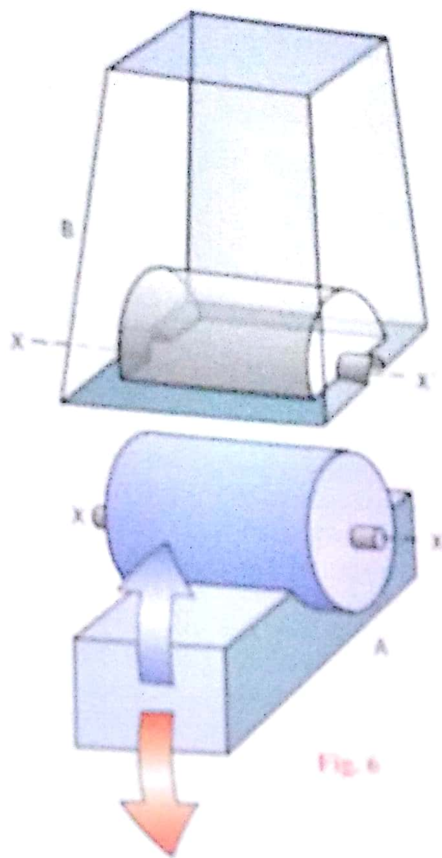


Fig. 6

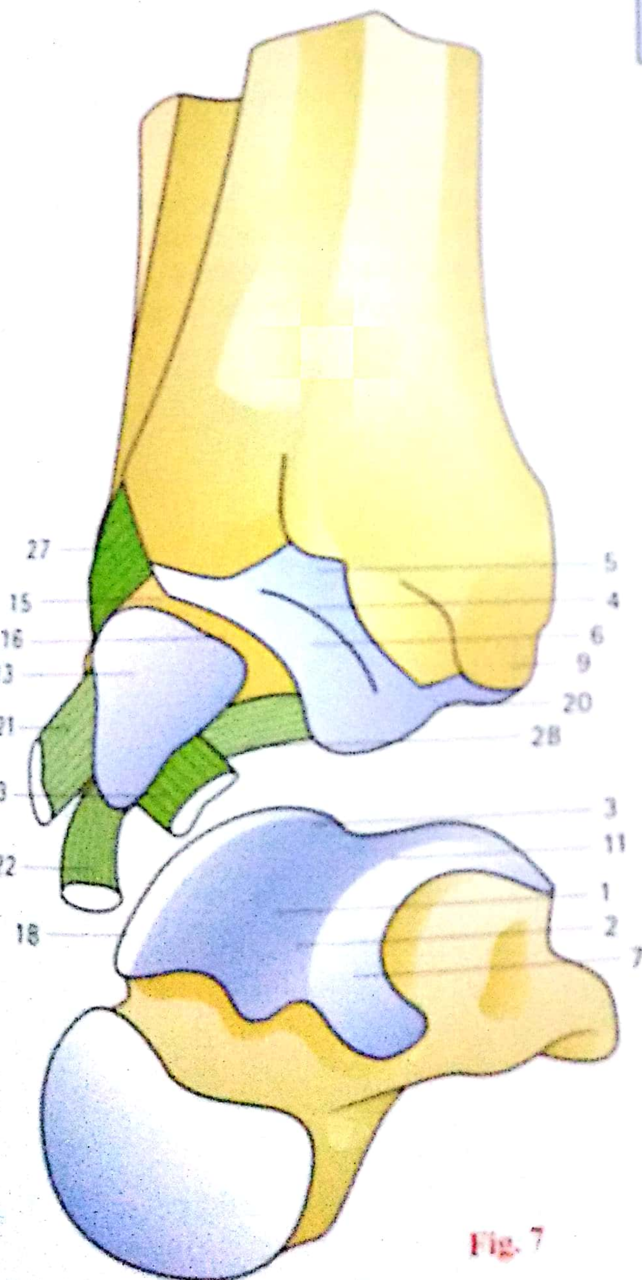


Fig. 7

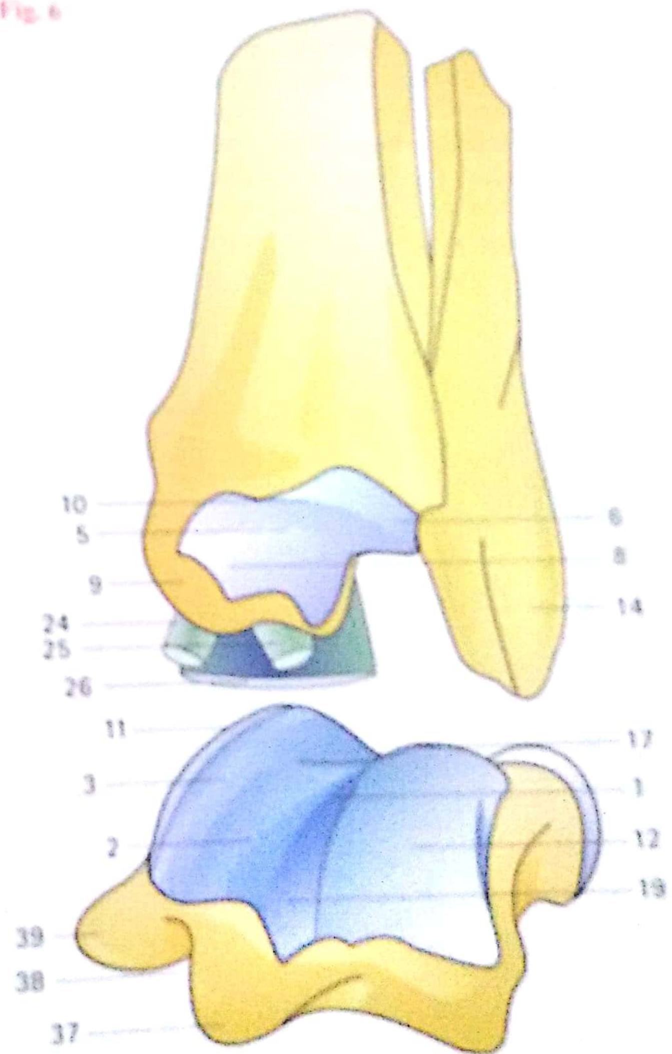


Fig. 8

Les surfaces de l'articulation talo-crurale *(suite)*

Une **vue supérieure (Fig. 9 : articulation talo-crurale en coupe des malléoles)** permet de comprendre parfaitement l'**encastrement** de la trochlée du talus entre les deux malléoles, ce que les chirurgiens appellent la **pince bi-malléolaire**. On distingue la **face supérieure de la trochlée du talus**, qui est plus large **L** en avant qu'arrière **l**. Ceci est, comme nous le verrons plus loin, d'une grande importance mécanique.

Cette face supérieure, qui a la forme d'une poulie, comporte une **facette interne 2**, qui participe à la constitution de l'interligne talo-crural médial **5**, et une **facette externe 3**, qui, symétriquement, forme l'interligne talo-crural latéral **6**. Ces deux facettes sont séparées par une gorge peu profonde **1** qui n'est pas strictement sagittale, mais légèrement déjetée *en avant et en dehors* **(flèche Z)**, dans la même direction que l'axe longitudinal du pied, alors que le col du talus est dirigé en *avant et en dedans* **(flèche T)** : il s'ensuit que le talus est tordu sur lui-même.

La **joue interne 7** de la trochlée du talus, visible sur une vue interne du talus **(Fig. 10)**, est sagittale **(Fig. 9)** et pratiquement plane – sauf en avant où elle est déjetée en dedans **(Fig. 7)**. Elle entre en contact **(Fig. 9)** avec la facette articulaire **8** de la face externe de la **malléole médiale 9**, recouverte d'un cartilage en continuité avec celui de la face inférieure du pilon tibial **4** (les anciens auteurs appelaient ainsi l'extrêmité inférieure du tibia). Entre ces deux surfaces, l'**angle dièdre 10** reçoit l'**arête aiguë 11** qui sépare versant interne et joue internes de la trochlée.

La **joue externe 12** est fortement déjetée en dehors **(Fig. 8)**, concave de haut en bas **(Fig. 11)** et aussi d'avant en arrière **(Fig. 9)** ; son « plan » est légèrement oblique en avant et en dehors **(ligne tirets)**. Elle entre en contact avec la facette articulaire **13** de la face interne **(Fig. 7)** de la **malléole latérale 14**. Cette facette est séparée de la surface tibiale par l'interligne tibio-fibulaire distal **15**. Cette **syndesmose** est maintenue par les ligaments tibio-fibulaires inférieurs **40**. Elle est comblée par une frange synoviale **16** (voir aussi p. 174), en contact avec l'arête **17** qui sépare le versant et la joue externes de la trochlée. Cette arête est chanfreinée* **(Fig. 12)** en avant **18** et en arrière **19** (voir p. 172).

Les deux faces latérales de la trochlée du talus sont donc étroitement maintenues par les malléoles **(flèches rouges)**. L'ensemble du pilon tibial et des deux malléoles est aussi désigné sous le nom de **mortaise tibio-fibulaire**. Les caractéristiques des malléoles s'opposent point par point :

- la malléole latérale est *plus volumineuse* que la malléole médiale ;
- elle descend *plus bas* **m (Fig. 11)** ;
- elle est *plus postérieure* **(Fig. 9)**, ce qui rend compte de la légère obliquité (20°) en dehors et en arrière de l'axe **XX'**.

On décrit sous le nom de troisième malléole de Destot **(Fig. 12)** la marge postérieure de la surface tibiale **20** qui descend plus bas **p** que la marge antérieure.

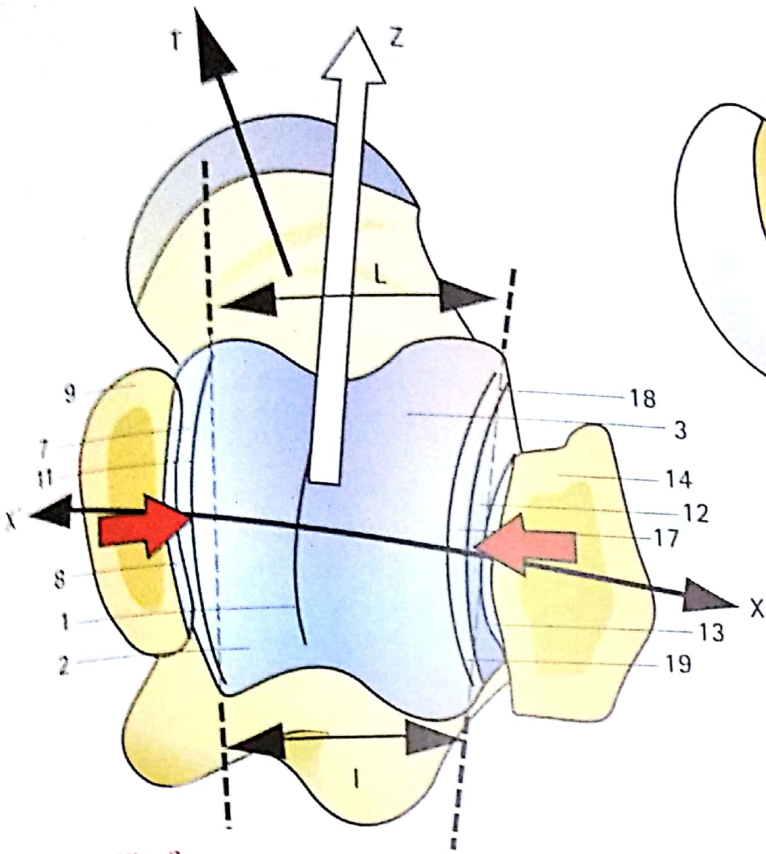


Fig. 9

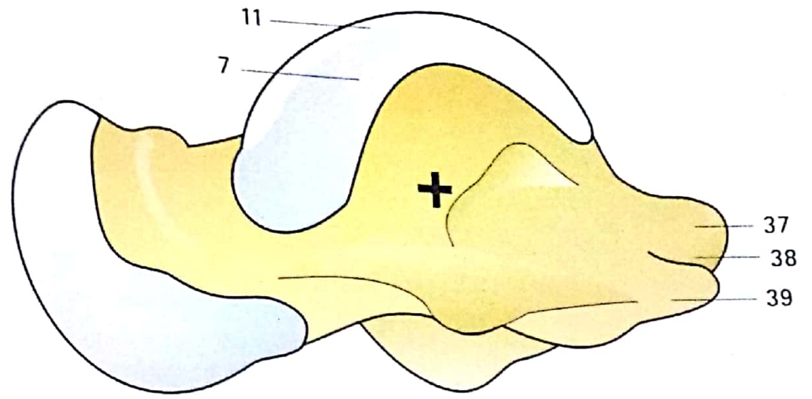


Fig. 10

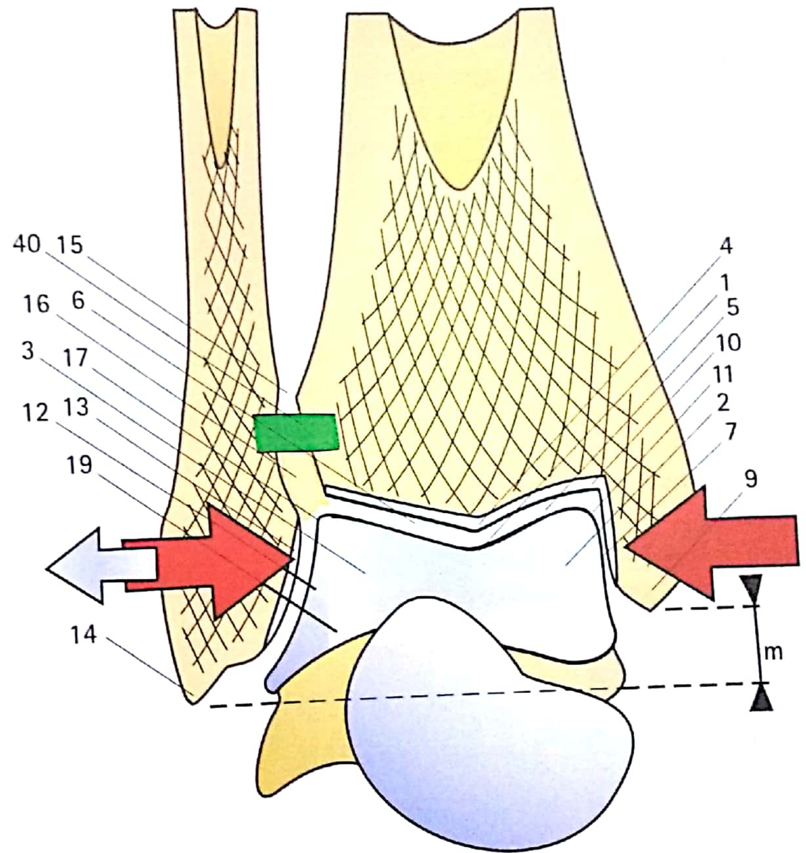


Fig. 11

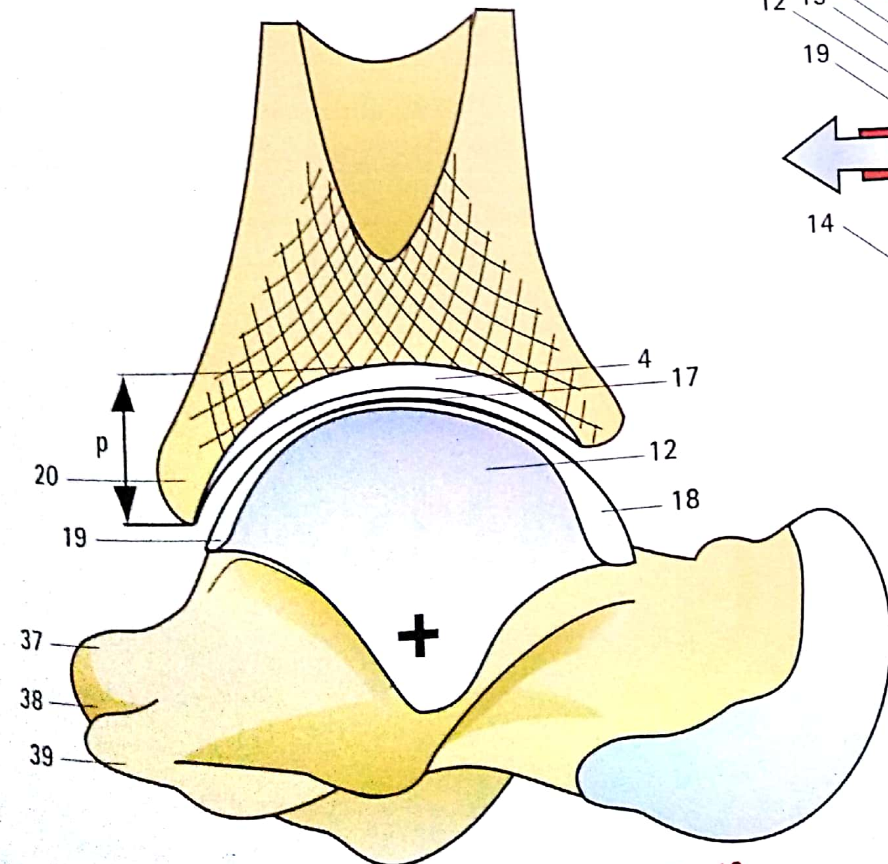


Fig. 12

Les légendes sont communes aux quatre figures.

Les ligaments de l'articulation talo-crurale

Les ligaments de l'articulation talo-crurale comportent deux systèmes ligamentaires principaux, les **ligaments collatéraux latéral et médial**, et deux systèmes accessoires, les **ligaments antérieur et postérieur**.

Les ligaments collatéraux forment de chaque côté de l'articulation de puissants *éventails fibreux*, dont le sommet se fixe sur la malléole correspondante, près de l'axe de flexion-extension XX', et dont la périphérie se répartit sur les deux os du tarse postérieur.

Le **ligament collatéral latéral** (**Fig. 13 : vue externe**) est constitué de **trois faisceaux**, deux à destinée talaire, un à destinée calcanéenne :

- le **faisceau antérieur** 21, attaché au bord antérieur de la malléole médiale 14, se dirige obliquement en bas et en avant pour se fixer sur le talus entre la joue externe et l'ouverture du sinus du tarse ;
- le **faisceau moyen** 22, partant près du sommet de la malléole et se dirigeant en bas et en arrière, se fixe sur la face externe du calcanéus. Son bord inférieur est longé par le ligament talo-calcanéen latéral 32 ;
- le **faisceau postérieur** 23 prend origine sur la face interne de la malléole (**voir Fig. 7, p. 163**), en arrière de la facette articulaire ; il se dirige horizontalement en dedans et légèrement en arrière pour se fixer sur le tubercule latéral du processus postérieur du talus 37. Sa position et sa direction font qu'il est plus visible sur une vue postérieure (**Fig. 14**). Il est prolongé par un petit ligament talo-calcanéen postérieur 31.

De la malléole latérale partent encore les **deux ligaments tibio-fibulaires inférieurs** (Fig. 14 et 15) : le ligament antérieur 27 et le ligament postérieur 28, dont nous verrons le rôle plus loin.

Le **ligament collatéral médial** (**Fig. 16 : vue interne**) se répartit en deux plans : un plan profond et un plan superficiel.

Le **plan profond** est constitué par deux faisceaux tibio-talaires :

- le **faisceau antérieur** 25, oblique en bas et en avant, se fixe sur la branche interne du joug talaire. Il est vu en transparence sur la figure 16 mais est visible sur la figure 15 ;
- le **faisceau postérieur** 24, oblique en bas et en arrière, se fixe dans une profonde fossette (Fig. 10) située sous la joue interne ; ses fibres les plus postérieures s'attachent sur le tubercule postéro-interne 39.

Le **plan superficiel**, très étalé et triangulaire, forme le **ligament deltoïde** 26. Recouvrant les faisceaux profonds, le ligament deltoïde a été, sur la vue antérieure (**Fig. 15**), encoché et récliné *pour laisser voir le faisceau profond antérieur* 25, et, sur la vue interne (**Fig. 16**), il a été figuré *transparent*. De son origine tibiale 36, il s'épanouit sur une ligne continue d'insertion inférieure sur le scaphoïde 33, le bord interne du ligament glénoïdien 34 et le petit processus du calcanéus 35. Ainsi ce ligament deltoïde ne prend-il, comme le faisceau moyen du ligament collatéral latéral, aucune insertion sur le talus ; c'est pourquoi les classiques l'ont nommé « tibio-scapho-gléno-sustentaculaire *transastragalien* ».

Les **ligaments antérieur** (**Fig. 15 : vue antérieure**) et **postérieur** (**Fig. 14 : vue postérieure**) de l'articulation talo-crurale sont de simples épaississements capsulaires.

Le **ligament antérieur** 29 joint obliquement la marge antérieure de la surface tibiale et la branche de bifurcation postérieure du joug talaire* (**Fig. 13**).

Le **ligament postérieur** 30 est formé de fibres à point de départ tibial et fibulaire convergeant vers le tubercule médial du processus postérieur du talus 39 qui, avec le tubercule latéral 37, forme les limites de la *profonde gouttière du muscle fléchisseur de l'hallux* 38. Cette gouttière de passage du tendon du muscle fléchisseur de l'hallux se continue à la face inférieure du sustentaculum tali 41.

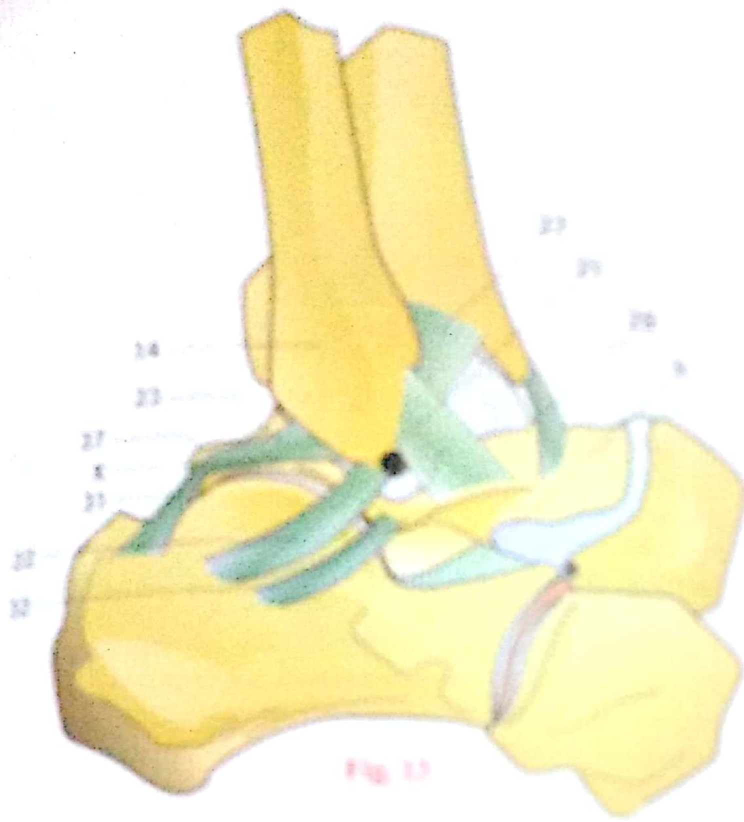


Fig. 13

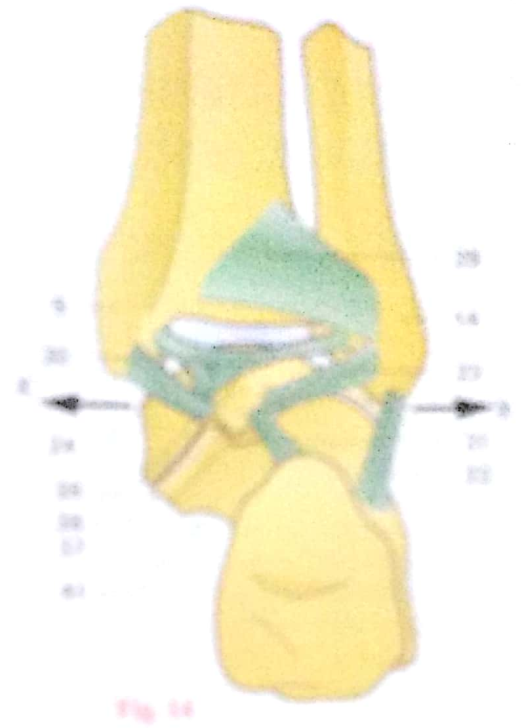


Fig. 14

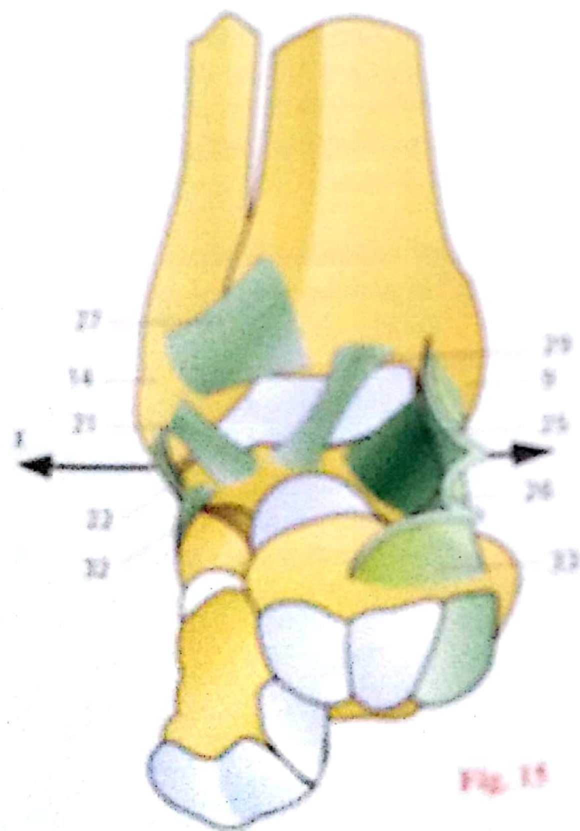


Fig. 15

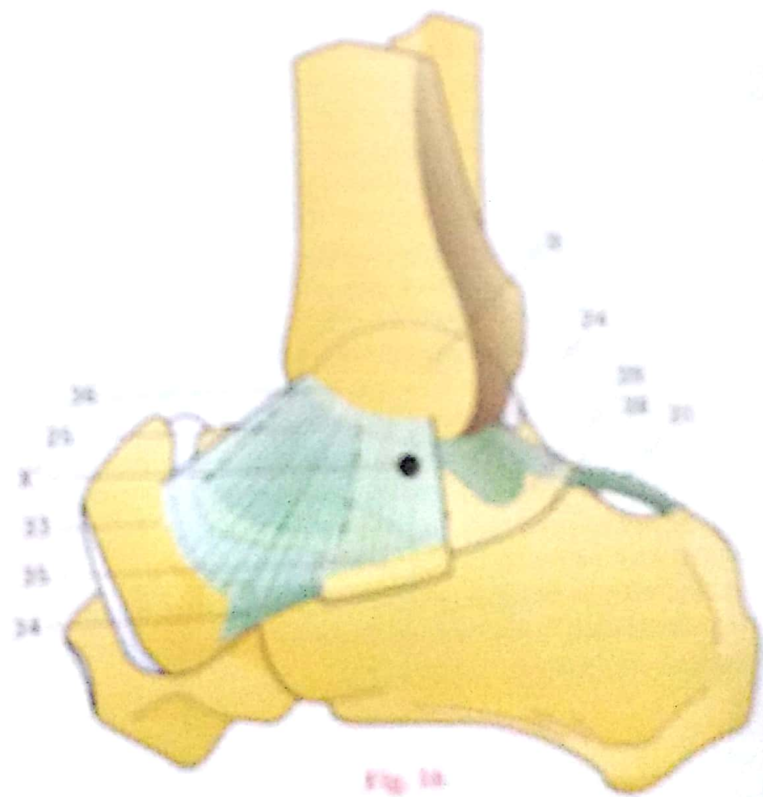


Fig. 16

Ces quatre figures sont inspirées de Rouvière. Les légendes sont communes à toutes les figures et à celles de la page précédente.

Stabilité antéro-postérieure de la cheville et facteurs limitant la flexion-extension

L'amplitude des mouvements de flexion-extension est avant tout déterminée par le développement des **surfaces articulaires** **(Fig. 17 : diagramme de profil)**. Lorsqu'on sait que la surface tibiale a un développement de 70° d'arc et que la trochlée du talus s'étend sur 140 à 150°, on en déduit par simple soustraction que l'**amplitude globale de la flexion-extension** est de **70 à 80°**. On constate aussi que le développement de la trochlée est plus grand en arrière qu'en avant, ce qui explique la *prédominance de l'extension sur la flexion*.

La **limitation de la flexion** **(Fig. 18)** est sous la dépendance de facteurs osseux, capsulo-ligamentaires et musculaires :

- **facteurs osseux** : dans la flexion extrême, la face supérieure du col du talus vient buter **1** contre la marge antérieure de la surface tibiale. Si le mouvement est trop poussé, le col peut s'y fracturer. La partie antérieure de la capsule est préservée du pincement parce qu'elle est attirée **2** par la tension des fléchisseurs **(flèche)**, grâce aux adhérences qu'elle contracte avec leurs gaines ;
- ***facteurs capsulo-ligamentaires*** : la partie postérieure de la capsule se tend **3**, de même que les faisceaux postérieurs des ligaments collatéraux **4** ;
- ***facteur musculaire*** : la *résistance tonique* du muscle triceps **5** intervient avant les facteurs précédents. Une *rétraction musculaire* limite donc précocement la flexion ; la cheville peut même rester en extension dans la position dite du « **pied équin*** » ; dans ce cas, on peut recourir à une opération d'*allongement du tendon calcanéen*.

La **limitation de l'extension** **(Fig. 19)** relève de facteurs identiques :

- ***facteur osseux*** : les tubercules du talus, l'externe surtout, viennent en contact **1** avec la marge postérieure de la surface tibiale. Il existe aussi, bien que plus rarement, des fractures du tubercule latéral par hyperextension, mais très souvent le tubercule latéral est *isolé anatomiquement* du talus, formant l'**os trigone**. La *capsule est préservée du pincement* **2** par un mécanisme analogue à celui de la flexion ;
- ***facteurs capsulo-ligamentaires*** : la partie antérieure de la capsule se tend **3**, ainsi que les faisceaux antérieurs des ligaments collatéraux **4** ;
- ***facteur musculaire*** : la résistance tonique des muscles fléchisseurs **5** limite en premier l'extension. L'hypertonie des fléchisseurs entraîne une flexion permanente dans la position dite du « **pied talus** » parce que le pied talus marche sur le talon.

La **stabilité antéro-postérieure de l'articulation talo-crurale** et sa **coaptation** sont assurées **(Fig. 20)** par la pesanteur **1** qui applique le talus sous la surface tibiale dont les marges antérieure **2** et postérieure **3** forment des *butées* empêchant l'échappée de la trochlée vers l'avant, ou plus souvent, vers l'arrière lorsque le pied en extension prend violemment contact avec le sol. Les ligaments collatéraux **4** assurent la *coaptation passive* et les muscles (non figurés ici) sont **tous coapteurs actifs** sur une articulation intacte.

Lorsque les mouvements de flexion-extension dépassent l'amplitude mécaniquement autorisée, l'un des éléments doit nécessairement céder. Ainsi, l'**hyperextension** peut causer soit une **luxation postérieure** **(Fig. 21)**, accompagnée d'une rupture capsulo-ligamentaire plus ou moins complète, soit une **fracture de la marge postérieure** **(Fig. 22)**, ce qui crée une subluxation postérieure. La déformation risque de se reproduire même après réduction correcte – elle est dite incoercible – si le fragment marginal dépasse en développement le tiers de la surface tibiale ; il faut alors le fixer chirurgicalement par vissage.

De même, l'**hyperflexion** peut entraîner soit une **luxation antérieure** **(Fig. 23)**, soit une **fracture de la marge antérieure** **(Fig. 24)**.

Dans l'**entorse du ligament collatéral latéral**, c'est le faisceau antérieur **(Fig. 25)** qui est le premier sollicité : d'abord simplement « étiré » dans les entorses bénignes, il se rompt dans les entorses graves. Il est alors possible de mettre en évidence un **tiroir antérieur**, soit cliniquement, soit surtout radiologiquement : le talus échappe vers l'avant et les deux arcs de cercle de la trochlée du talus et du plafond de la mortaise tibiale ne sont plus concentriques ; lorsque les centres de courbure sont décalés de plus de 4-5 mm, cela traduit une **rupture du faisceau antérieur du ligament collatéral latéral**.

* Le terme « équin » provient de *equus* qui, en latin, signifie « cheval » : le pied équin

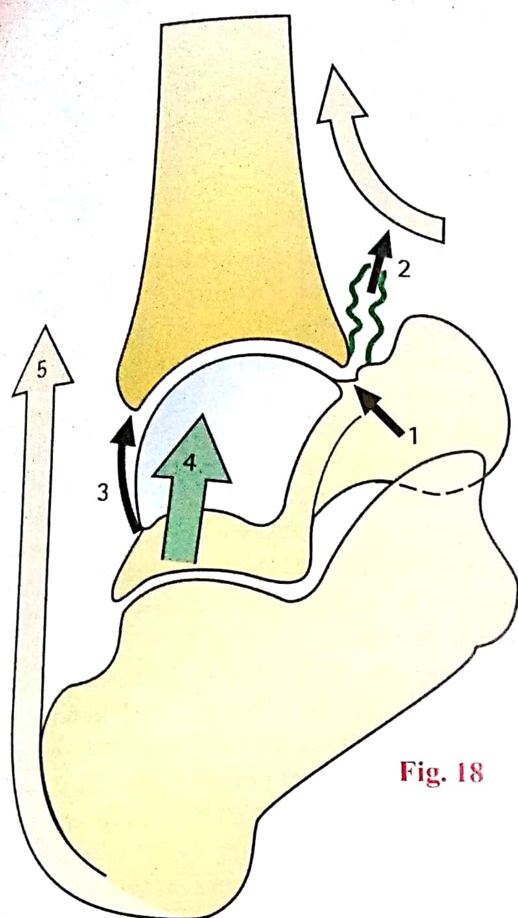


Fig. 18

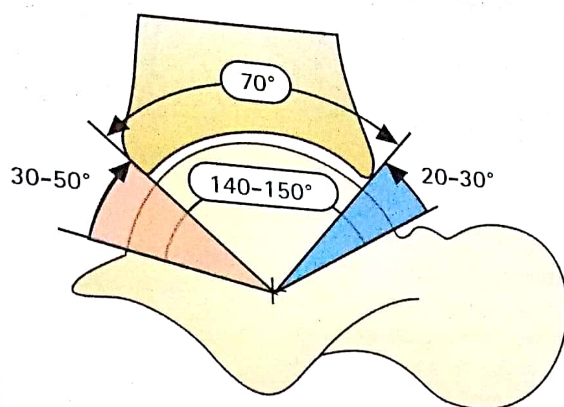


Fig. 17

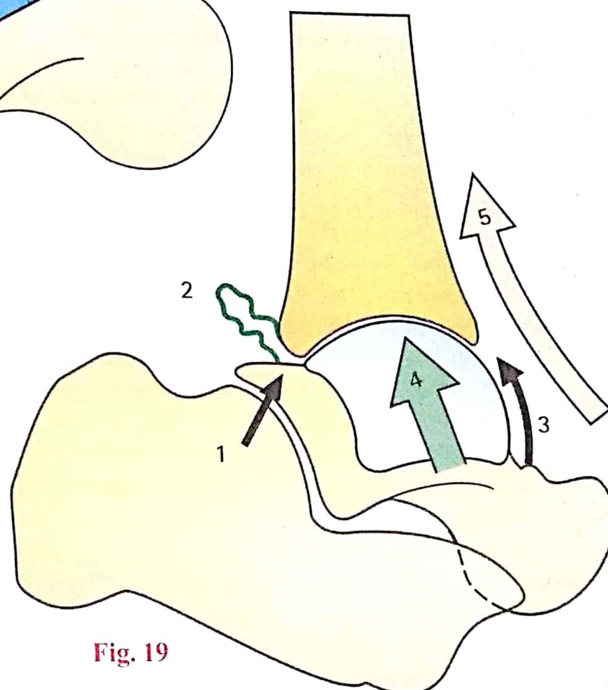
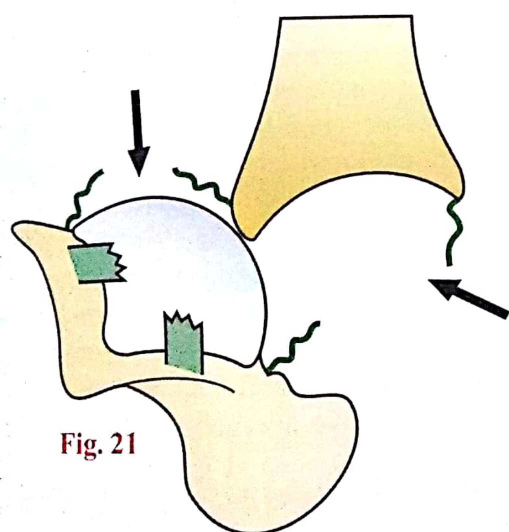


Fig. 19


Fig. 21

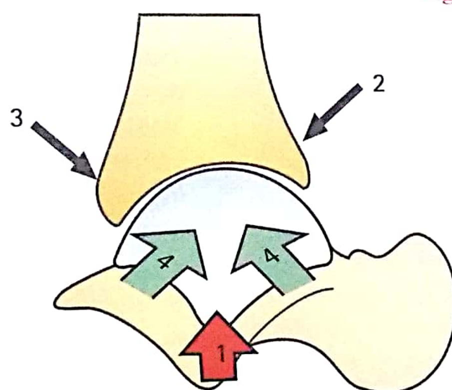
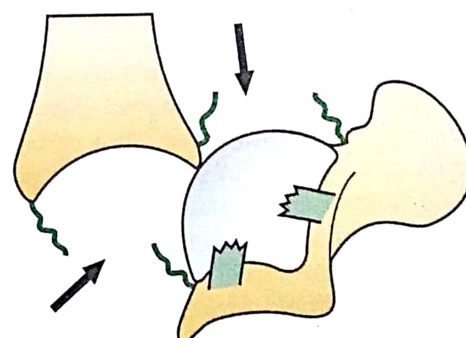
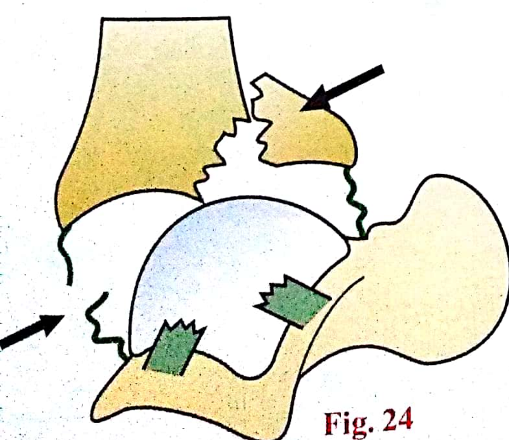
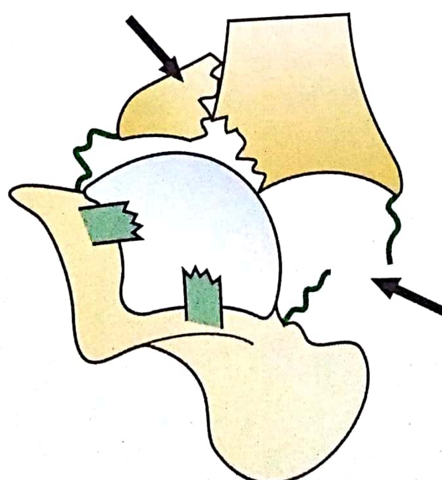
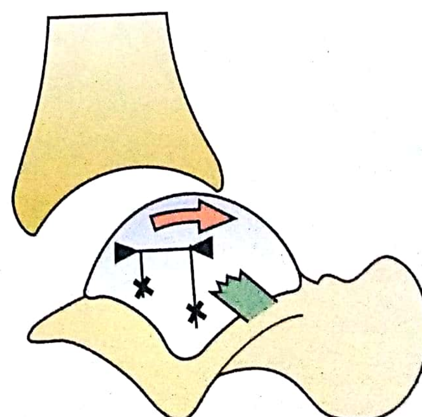


Fig. 20


Fig. 23


Fig. 24


Fig. 22


Fig. 25

Stabilité transversale de l'articulation talo-crurale

Articulation à **un seul degré de liberté**, l'articulation talo-crurale, du fait de sa construction même, se voit interdire tout mouvement autour de l'un des deux autres axes. **Elle doit cette stabilité à un encastrement étroit**, véritable assemblage en tenon et mortaise (terme de menuiserie) : le tenon de la poulie talaire est strictement maintenu dans la mortaise tibio-fibulaire **(Fig. 26)**. Chaque branche de la **pince bi-malléolaire** contient latéralement le talus à condition que l'écart entre la malléole latérale **A** et la malléole médiale **B** reste immuable. Ceci suppose, outre l'intégrité des malléoles, celle des ligaments tibio-fibulaires inférieurs **1**. De plus, les puissants ligaments collatéraux latéral **2** et médial **3** empêchent tout mouvement de roulis du talus sur son axe longitudinal.

Lorsqu'un mouvement forcé d'abduction porte le pied en dehors, la joue externe du talus exerce une pression **(Fig. 33 : flèche 1)** sur la malléole fibulaire. Plusieurs éventualités sont alors possibles.

- La **pince bi-malléolaire est disloquée (Fig. 27)** par rupture des ligaments tibio-fibulaires inférieurs **1** : ainsi se trouve créé le *diastasis intertibio-fibulaire*. Le talus n'est plus maintenu et peut effectuer des *mouvements de latéralité* qu'on nomme « ballotement talaire ». Il peut encore **(Fig. 28)** effectuer une *rotation sur son axe longitudinal* (bascule ou « gîte »), favorisée par une *entorse du ligament collatéral médial* **3** – ici le ligament n'a subi qu'une élongation : c'est l'*entorse bénigne* – ; enfin, il peut tourner **(Fig. 33)** *autour de son axe vertical* **(flèche Abd)**, tandis que la partie postérieure de la trochlée détache la marge postérieure du pilon tibial **(flèche 2)**.
- Si le mouvement est poussé plus loin **(Fig. 32)** le ligament collatéral médial se rompt à son tour **3** : c'est l'*entorse grave du ligament collatéral médial*, qui peut être associée à un *diastasis intertibio-fibulaire* **1**.
- Ou bien **(Fig. 30)**, c'est la *malléole médiale qui cède* **B** *en même temps que la malléole latérale* **A** au-dessus des ligaments tibio-fibulaires inférieurs **1**. Ainsi se trouve réalisée la **fracture de Dupuytren** dans sa variété « haute ». Quelquefois le trait fibulaire siège beaucoup plus haut, sur le col de la fibula: c'est la **fracture de Maisonneuve**, non figurée ici.
- Très souvent les ligaments tibio-fibulaires inférieurs résistent **(Fig. 29)**, ou tout au moins l'antérieur. La *fracture de la malléole médiale* **B** est alors associée à une fracture de la malléole latérale située au-dessous ou à travers l'articulation tibio-fibulaire inférieure. On parle alors de **fracture de Dupuytren** dans sa variété « **basse** » ou d'un de ses équivalents lorsque la fracture de la malléole médiale est remplacée **(Fig. 31)** par une *rupture du ligament collatéral médial* **3**. Les fractures de Dupuytren « **basses** » comportent souvent une **fracture associée de la marge postérieure** détachant un troisième fragment postérieur qui peut faire bloc avec le fragment malléolaire médial.
- À côté de ces dislocations de la pince bi-malléolaire par un mouvement d'abduction, on observe des **fractures bi-malléolaires par adduction (Fig. 34)** : la pointe du pied, entraînée *en dedans*, fait tourner **(Fig. 33)** le talus autour de son axe vertical **(flèche Add)**, la joue interne fait sauter **(flèche 3)** la malléole médiale **B (Fig. 34)** et la bascule du talus *rompt la malléole latérale* **A** au ras du pilon tibial.
- La plupart du temps, cependant, le mouvement d'adduction ou d'inversion n'aboutit pas à une fracture mais à une **entorse du ligament collatéral latéral**. Dans la majorité des cas, heureusement, cette entorse est bénigne, le ligament étant *seulement distendu et non rompu* et pourra guérir sans opération chirurgicale. Par contre, en cas d'**entorse grave**, *le ligament collatéral latéral est rompu*, ce qui compromet aussi la stabilité de l'articulation talo-crurale. Sur une radiographie de face de la cheville *en inversion forcée* (au besoin après anesthésie locale), on constate alors **(Fig. 35)** une *bascule du talus* : les deux lignes de l'interligne supérieur, au lieu d'être parallèles, forment un *angle ouvert en dehors de plus de 10-12°*. Certaines chevilles sont en effet hyperlaxes et il est bon de faire un cliché comparatif de la cheville supposée saine. Une entorse grave nécessite parfois un acte chirurgical.
- Il va sans dire que **toutes ces lésions de la pince bi-malléolaire exigent une correction stricte** si l'on veut rétablir la stabilité de l'articulation et son fonctionnement normal.

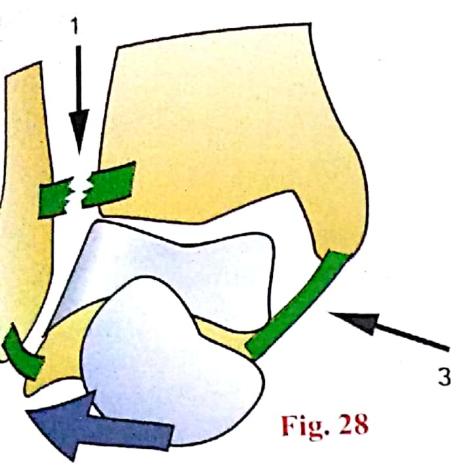


Fig. 28

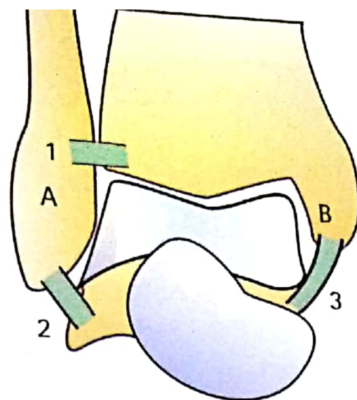


Fig. 26

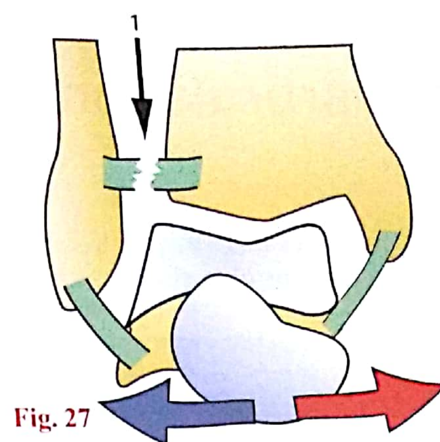


Fig. 27

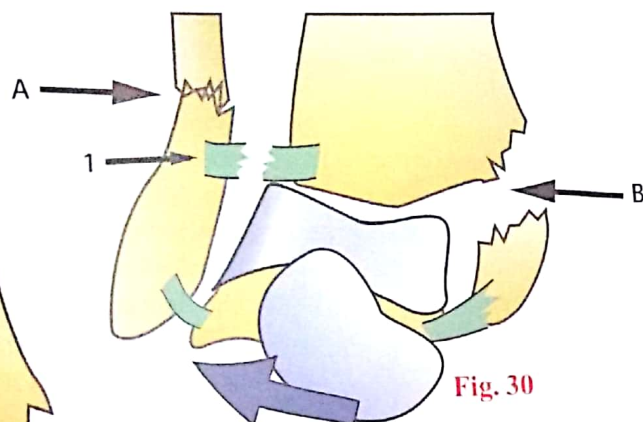


Fig. 30

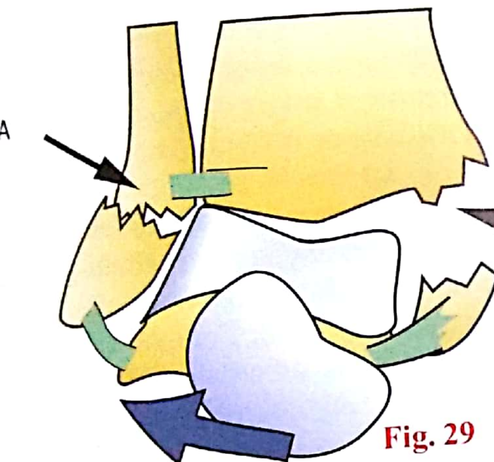


Fig. 29

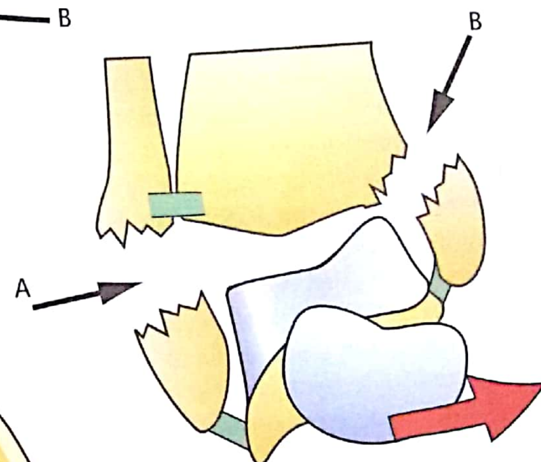


Fig. 34

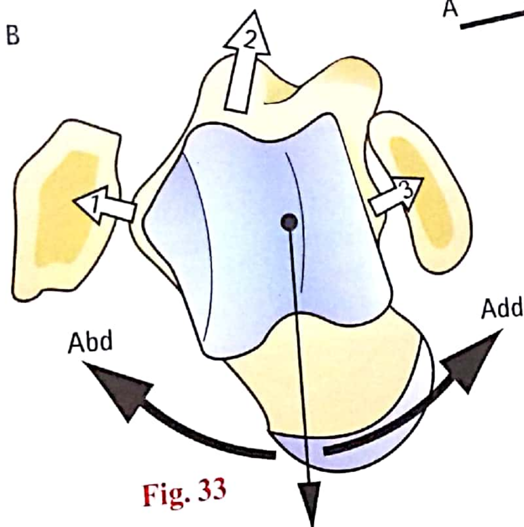


Fig. 33

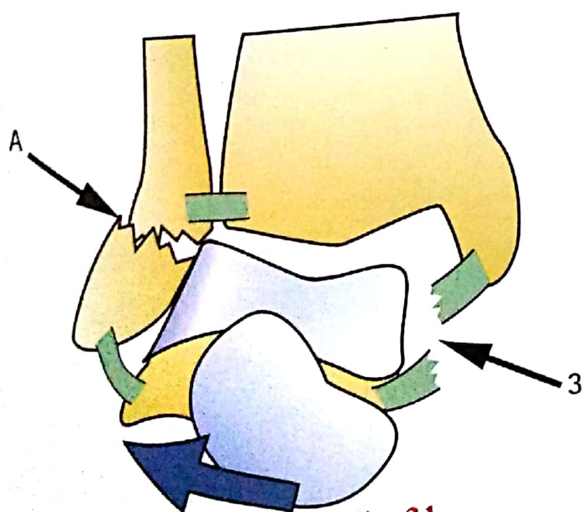


Fig. 31

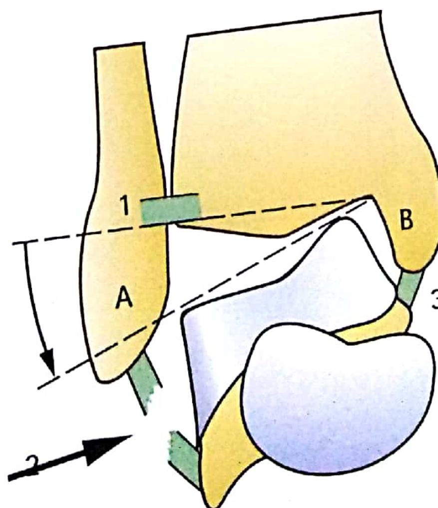


Fig. 35

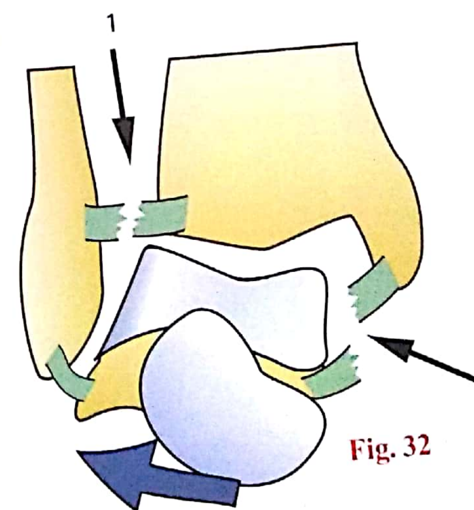


Fig. 32

Les articulations tibio-fibulaires

Tibia et fibula s'articulent par leurs deux extrémités au niveau des **articulations tibio-fibulaires proximale** (Fig. 36 à 38) et **distale** (Fig. 39 à 41). Comme nous le verrons à la page suivante, ces articulations sont *mécaniquement liées entre elles et à l'articulation talo-crurale* et il est donc logique de les étudier à propos de la cheville.

L'**articulation tibio-fibulaire proximale** est bien exposée (Fig. 36 : vue externe) lorsqu'on a fait pivoter la fibula après avoir coupé son ligament antérieur 1 et l'expansion antérieure 2 du tendon du biceps 3. L'articulation s'ouvre alors autour de la charnière constituée par le ligament postérieur 4. Cette articulation est une **arthrodie** qui met en contact deux surfaces ovalaires planes ou légèrement convexes :

- la **facette tibiale** 5 est située sur le pourtour postéro-externe du plateau tibial ; elle est orientée *obliquement en arrière, en bas et en dehors* (flèche blanche) ;
- la **facette fibulaire** 6 siège sur la face supérieure de la tête de la fibula. Son orientation est *opposée à celle de la facette tibiale* (flèche blanche). Elle est surplombée par le processus styloïde de la fibula 7 sur laquelle se fixe le tendon du biceps fémoral 3. Le ligament collatéral latéral du genou 8 s'insère entre le biceps et la facette articulaire.

Une *vue externe* (Fig. 37 : l'articulation tibio-fibulaire n'est pas ouverte) précise la position très postérieure de la tête de la fibula en place. On y voit aussi le ligament antérieur 1 de l'articulation tibio-fibulaire, court et quadrilatère, et l'expansion du biceps 2, qui va se fixer sur le condyle latéral du tibia.

Une *vue postérieure* (Fig. 38) montre les rapports étroits que contracte le muscle poplité 9 avec l'articulation tibio-fibulaire supérieure, tandis qu'il glisse sur son ligament postérieur 4.

L'**articulation tibio-fibulaire inférieure** (Fig. 39), semblablement ouverte, révèle l'absence de surfaces cartilagineuses : c'est donc une **syndesmose**. Sur le tibia, une **surface concave** 1, plus ou moins rugueuse, délimitée par la bifurcation du bord latéral de l'os, s'oppose à une **surface fibulaire** 2, convexe, plane ou même concave, au-dessous de laquelle se trouve la facette fibulaire 3 de l'articulation talo-crurale, flanquée de l'insertion du faisceau postérieur du ligament collatéral latéral 4.

Le **ligament antérieur de l'articulation tibio-fibulaire inférieure** 5, épais, nacré, se dirige obliquement en bas et en dehors (Fig. 40 : vue antérieure) ; son bord inférieur empiète sur l'angle latéral de la mortaise ; il vient ainsi *biseauter* (flèche double) la partie antérieure de l'arête latérale de la trochlée du talus dans les mouvements de flexion de la cheville. C'est la raison du méplat que présente l'arête externe de la poulie talaire.

Le **ligament postérieur** 6, plus épais et plus large (Fig. 41 : vue postérieure), s'étend très loin vers la malléole médiale. Par le même mécanisme, il chanfreine la partie postérieure de la même arête lors des mouvements d'extension de la cheville.

Outre les ligaments tibio-fibulaires, les deux os de la jambe sont réunis (Fig. 39) par le **ligament interosseux**, fixé sur le bord latéral du tibia et la face médiale de la fibula (ligne tirets verte). On le retrouve à propos des « loges de la jambe », p. 210.

L'articulation tibio-fibulaire inférieure ne met pas les deux os en contact direct : ils restent séparés par du **tissu cellulo-graisseux** et cet espace est visible sur une radiographie de face bien centrée de la cheville (Fig. 42). Normalement, l'ombre de la fibula **c** empiète plus – de 8 mm – sur le tubercule tibial antérieur **a** qu'elle n'est séparée – 2 mm – du tubercule postérieur **b**. Si la distance **cb** est plus grande que la distance **ac**, on peut parler de *diastasis intertibio-fibulaire*. Notez que sur la radio de face, il se confirme que la malléole fibulaire *descend* nettement plus bas que la malléole tibiale.

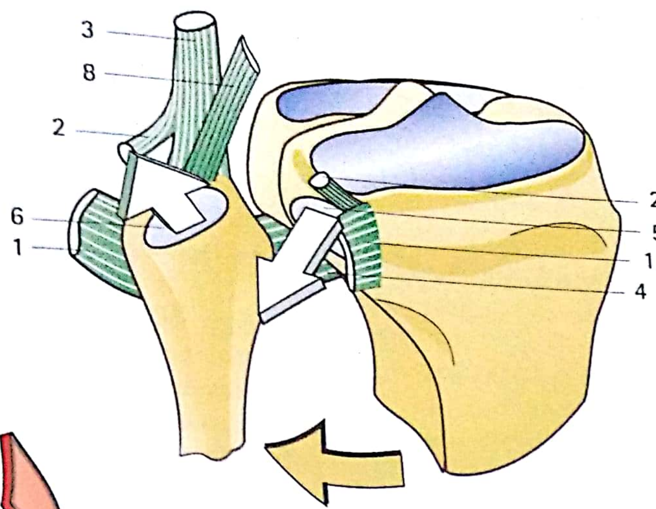


Fig. 36

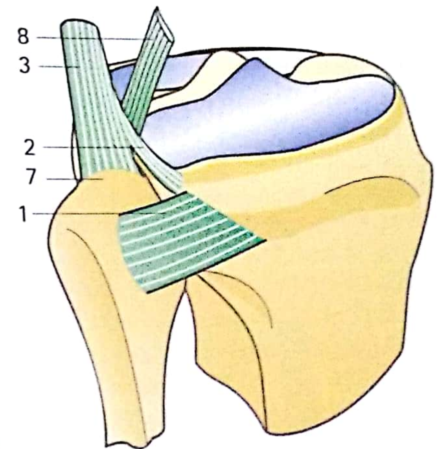


Fig. 37

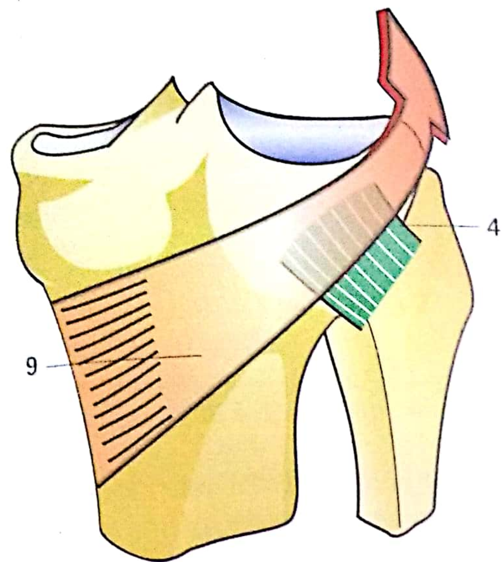


Fig. 38

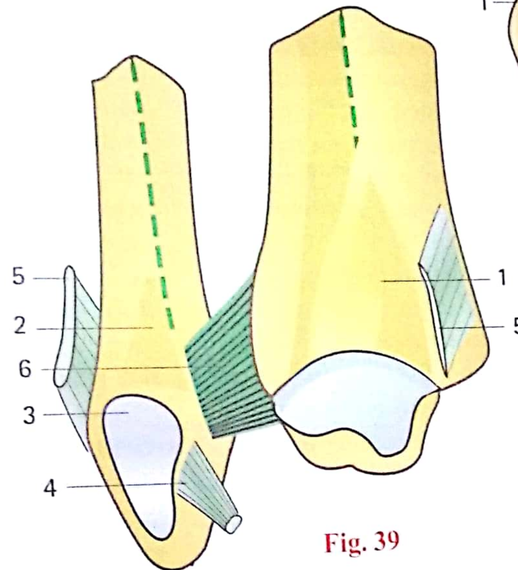


Fig. 39

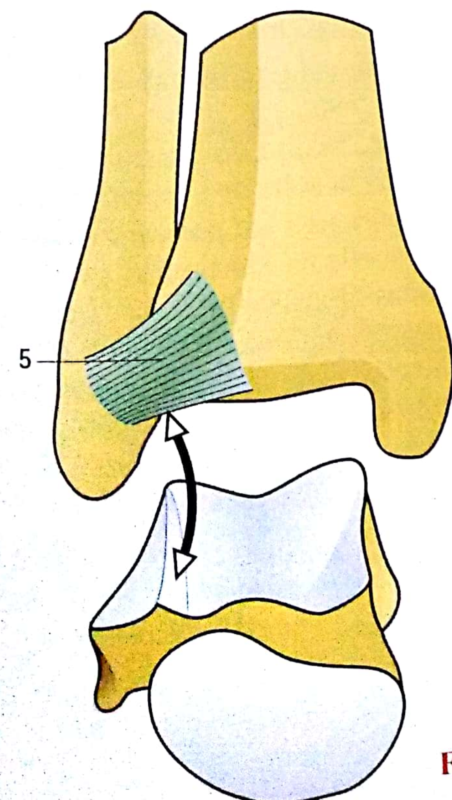


Fig. 40

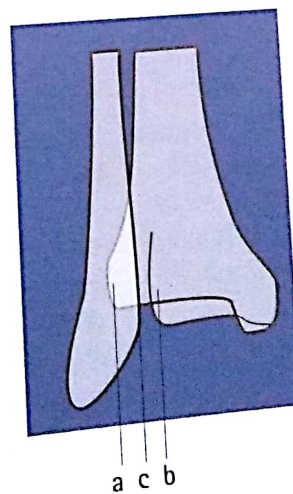


Fig. 42

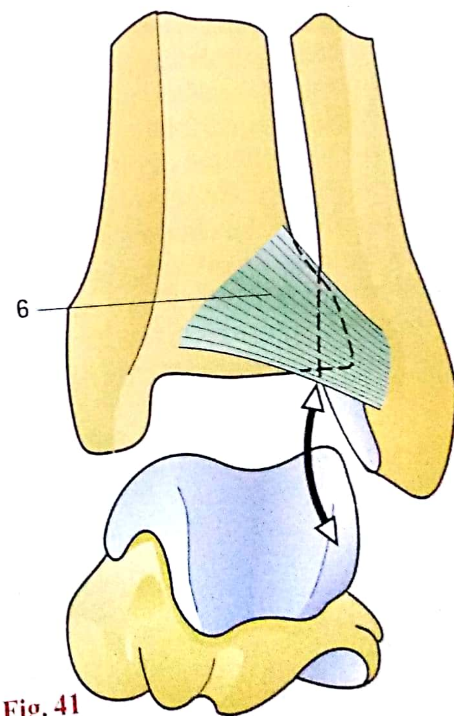


Fig. 41

Physiologie des articulations tibio-fibulaires

La flexion-extension de l'articulation talo-crurale entraîne *automatiquement la mise en jeu des deux articulations tibio-fibulaires* : elles sont *mécaniquement liées*.

L'articulation tibio-fibulaire inférieure est la première intéressée. Son fonctionnement a été bien élucidé par Pol Le Cœur (1938). Il découle avant tout de la **forme de la trochlée du talus (Fig. 43 : vue supérieure)** : la **joue interne, tibiale T** est sagittale, tandis que la **joue externe, fibulaire P**, est contenue dans un *plan oblique en avant et en dehors*. Il s'ensuit que la largeur de la trochlée est plus faible en arrière **aa'** qu'en avant **bb'** : la différence **e** est de 5 mm. Pour maintenir étroitement les deux joues de la trochlée, *l'écart intermalléolaire doit donc varier* entre certaines limites **i** : minimum dans l'extension quand la malléole latérale se rapproche de la malléole médiale **(Fig. 44 : vue inférieure)**, maximum dans la flexion en raison du mouvement inverse **(Fig. 45)**. Sur le cadavre, on peut d'ailleurs déclencher l'extension de la cheville, rien qu'en comprimant fortement et transversalement les malléoles.

On constate, en outre, sur une préparation anatomique **(Fig. 44 et 45)** que ce mouvement d'écartement et de rapprochement des malléoles s'accompagne d'une *rotation axiale de la malléole latérale*, le ligament tibio-fibulaire antérieur **1** faisant office de *charnière*. Cette rotation est facilement mise en évidence par une broche transfixant horizontalement la malléole latérale : entre sa position **nn'** lors de l'extension **(Fig. 44)** et sa position **mm'** lors de la flexion **(Fig. 45)**, il existe une différence angulaire de 30°, en rotation interne. Simultanément le ligament tibio-fibulaire postérieur **2** se tend. Soulignons cependant que cette rotation axiale de la malléole latérale, si elle est plus limitée sur le vivant, n'en existe pas moins. Par ailleurs, la **frange synoviale f** contenue dans l'articulation subit un déplacement : chassée vers le bas **1** lorsque les malléoles se rapprochent dans l'extension **(Fig. 46)**, elle remonte **2** lors de la flexion **(Fig. 47)**.

Enfin, la fibula effectue des **mouvements verticaux (Fig. 48 et 49 : la fibula a été schématisée sous forme d'une règle quadrangulaire)**. En effet, attachée au tibia par les *fibres obliques en bas et en dehors de la membrane interosseuse* (pour la compréhension, une seule fibre a été dessinée en noir), la fibula, en s'écartant du tibia **(Fig. 49)**, se soulève légèrement, tandis qu'elle s'abaisse lorsqu'elle s'en rapproche **(Fig. 48)**.

En résumé, lors de la **flexion de la cheville (Fig. 50 : vue de face)** :

- la malléole latérale *s'écarte de la malléole médiale* **(flèche 1)** ;
- simultanément, elle *s'élève légèrement* **(flèche 3)**, tandis que les fibres des ligaments tibio-fibulaires et de la membrane interosseuse ont tendance à devenir *horizontales* **xx'** ;
- enfin, elle *tourne sur elle-même* dans le sens de la *rotation interne* **(flèche 2)**.

Lors de l'**extension de la cheville (Fig. 51 : vue de face)**, l'inverse se produit :

- il y a un *rapprochement* de la malléole latérale de la malléole médiale **(flèche 1)**. Ce mouvement est *actif* comme l'a montré Pol Le Cœur : la contraction du muscle postérieur, dont les fibres s'insèrent sur les deux os, resserre la pince bi-malléolaire **(Fig. 52 : coupe du côté droit, fragment inférieur, les flèches figurent la contraction des fibres du muscle TP)**. Ainsi la trochlée du talus se trouve-t-elle *aussi bien maintenue quel que soit le degré de flexion-extension* de la cheville ;
- il y a un *abaissement* de la malléole latérale **(flèche 2)** avec *verticalisation* des fibres ligamentaires **yy'** ;
- il y a une légère *rotation interne* de la malléole latérale **(flèche 3)**.

L'articulation tibio-fibulaire supérieure subit le contrecoup des mouvements de la malléole latérale :

- lors de la *flexion de la cheville* **(Fig. 49)**, la facette fibulaire glisse vers le haut **h** et l'interligne bâille en bas – du fait de l'écart des malléoles **(flèche rouge)** – et en arrière du fait de la rotation externe **(flèche rose)** ;
- lors de l'*extension de la cheville* **(Fig. 48)**, on observe les mouvements inverses : abaissement, fermeture de l'angle et rotation interne.

Ces déplacements sont faibles, mais non négligeables : la meilleure preuve en est que dans la suite de l'évolution, *l'articulation tibio-fibulaire supérieure ne s'est pas encore soudée*, ce qui aurait fini par survenir si elle ne fonctionnait pas…

Ainsi, par le jeu des articulations tibio-fibulaires, des ligaments et du tibial postérieur, *la pince bi-malléolaire s'adapte en permanence* aux variations de largeur et de courbure de la trochlée du talus, *assurant ainsi la **stabilité transversale** de l'articulation talo-crurale*. C'est, entre autres, pour ne pas compromettre cette adaptabilité que le *boulonnage* a été abandonné dans le traitement du diastasis tibio-fibulaire.

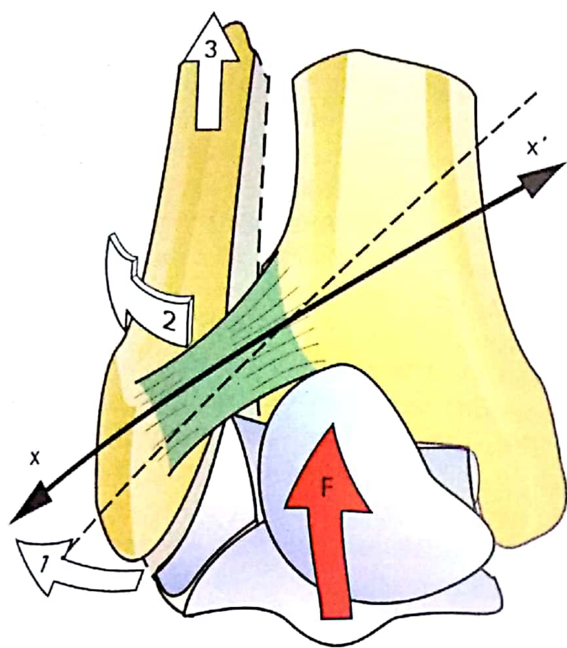


Fig. 50

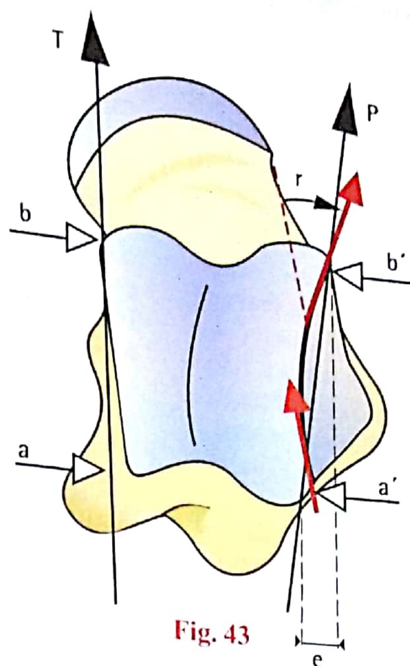


Fig. 43

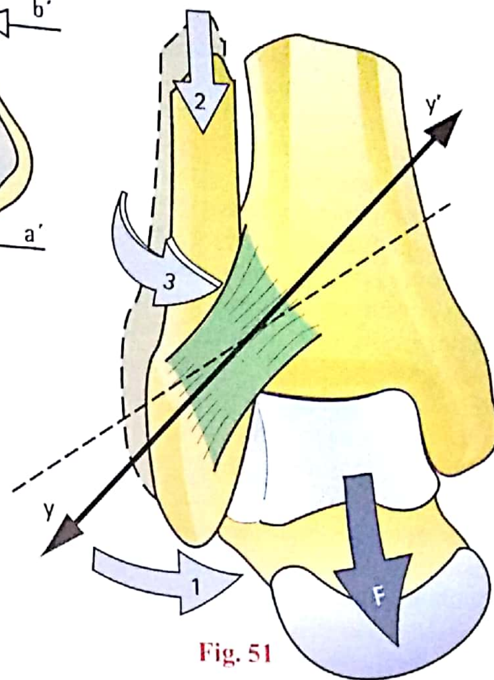


Fig. 51

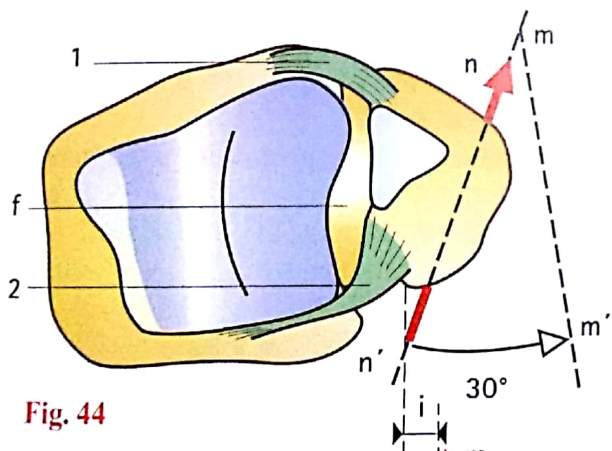


Fig. 44

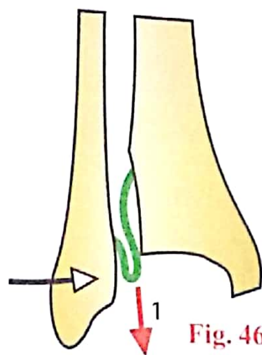


Fig. 46

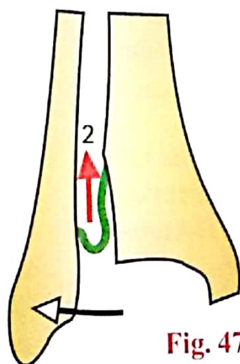


Fig. 47

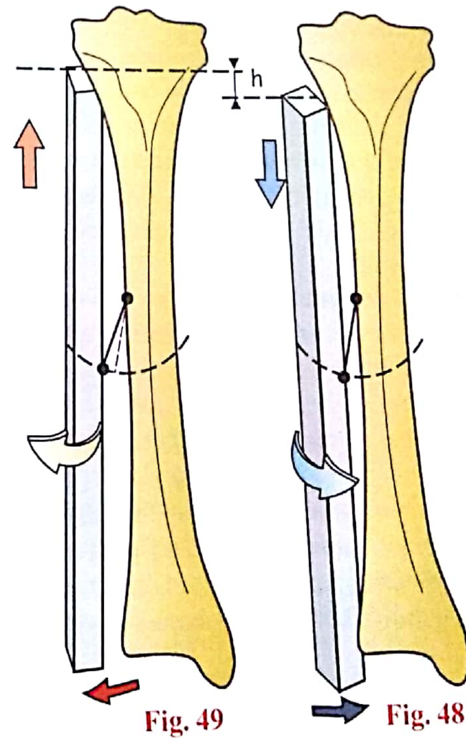
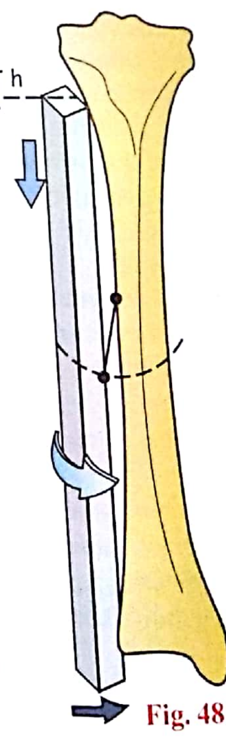


Fig. 49


Fig. 48

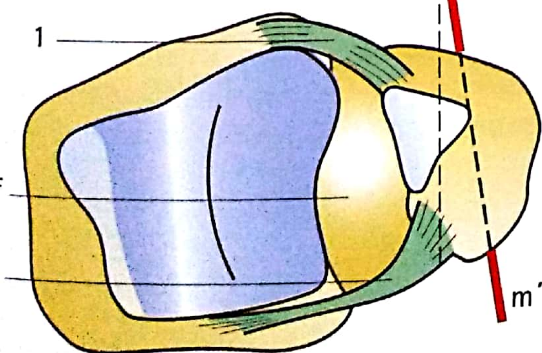


Fig. 45

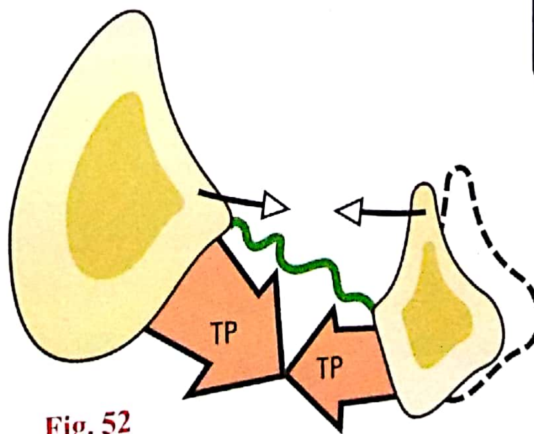


Fig. 52

Pourquoi la jambe comporte-t-elle deux os ?

Dans le volume I, la question était posée : « pourquoi l'avant-bras comporte-t-il deux os ? », à laquelle nous avons tenté de donner une réponse pour expliquer la prono-supination (voir Volume I, p. 136). La même question se pose à propos de la jambe, mais la réponse est différente, car la rotation longitudinale de la jambe s'effectue dans l'articulation du genou, à condition qu'elle soit fléchie… **Quel peut donc être l'intérêt du squelette jambier à deux os ?**

Une tentative d'explication peut découler des **travaux de Pol le Cœur** (relatés dans sa thèse, 1938), qui a décrit le fonctionnement très particulier de l'articulation talo-crurale, qui est, en réalité, une articulation « à géométrie variable ».

Dans les pages précédentes, nous avons vu les conséquences de la forme si particulière de la « **trochlée du talus** » **(Fig. 53 : vue supérieure du talus)** : plus large en avant qu'en arrière, avec une incurvation et une obliquité de sa joue externe. De l'extension à la flexion complète, la face inférieure articulaire de l'extrémité distale du tibia, aussi nommé « pilon tibial », prend contact avec la surface supérieure de la trochlée suivant deux aires de surface nettement différente **(Fig. 54)** :

- en **extension (contour bleu)**, c'est la partie postérieure, étroite de la poulie qui est en contact avec le tibia : l'aire de contact est minimum ;
- en **flexion (contour rouge)**, le tibia rentre en contact avec la partie la plus large de la trochlée.

Si l'on dessine séparément les deux surfaces **(Fig. 55)**, on constate que la surface d'appui antérieure est nettement plus étendue que la postérieure. C'est encore plus net si on les superpose **(Fig. 56)** : la surface antérieure déborde de toutes parts l'inférieure.

L'intérêt de cette disposition, c'est que les charges sur le talus, lors de la marche, sont **maximum en flexion**, au moment où la jambe d'appui passe en avant du pas au sol… C'est le moment où le contact entre les deux os est maximum. Par contre, **en extension, la charge diminue**, et la stabilité est moins nécessaire, et c'est la position où l'aire de contact est minimum.

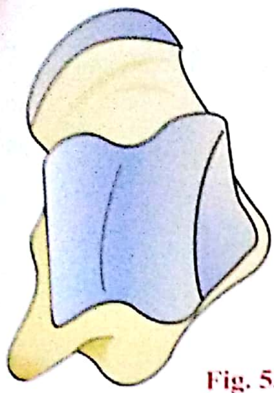
Ce changement de largeur de la trochlée du talus nécessite une **adaptation permanente de l'écart entre les deux surfaces malléolaires**, qui ne peut être obtenue que grâce à la séparation de la « mortaise tibio-fibulaire » en deux parties, ce qui impose qu'elle soit *constituée de deux os*. Voilà pourquoi il y a deux os… !

Il reste un problème délicat à résoudre : le **réglage permanent de l'écart intermalléolaire**, qui comme le montre un schéma stylisé **(Fig. 57)** qui figure la trochlée du talus et les deux positions extrêmes de la pince bi-malléolaire, s'élargit en flexion **F (flèches rouges)** et se rétrécit en extension **E (flèches bleues)**. C'est là qu'intervient un dispositif **(Fig. 58 : vue postérieure du squelette jambier)** qu'on pourrait qualifier de *génial* : le muscle tibial postérieur **1**, qui est extenseur de la cheville, prend insertion sur les deux os. Donc, sa contraction les rapproche. Au moment de l'extension de la cheville, ce muscle assure donc **simultanément** l'extension et le rapprochement de la malléole latérale vers la malléole médiale, donc l'adaptation à une largeur moindre de la trochlée du talus. Il en est de même, à un moindre degré, du muscle fléchisseur de l'hallux **2**. L'adaptation de la pince bi-malléolaire à l'extension est donc active et d'origine musculaire.

Par contre, son adaptation à la flexion est passive : l'écartement des deux malléoles est forcé par l'élargissement progressif de la trochlée du talus, freiné par les ligaments, mais aussi par les muscles précédemment cités, qui s'opposent à la flexion de l'articulation talo-crurale.

On peut aussi constater que l'incurvation de la joue externe du talus fait que la pression sur la facette fibulaire est toujours perpendiculaire à sa surface, d'où la **rotation automatique de la fibula** sur son axe longitudinal.

L'apparition de ces **deux os sur le segment intermédiaire des quatre membres** remonte à quatre cents millions d'années **(Fig. 59 : transformation de la nageoire a, en patte b et c)** lorsque, à l'époque du dévonien moyen, notre ancêtre lointain, un obscur poisson crossoptérygien, l'eusthénoptéron **(Fig. 60)**, sortit de la mer à la suite d'une *transformation de ses nageoires en pattes*, et devint un *trétrapode*, semblable à un lézard ou à un crocodile actuels. La réorganisation progressive de ses nageoires conserva un seul rayon **h** pour le segment proximal, et pour le segment intermédiaire, deux rayons côte à côte, les futurs radius **r** et ulna **u**, ou tibia et fibula pour la jambe, suivis des os du carpe ou du tarse et des cinq rayons des doigts ou des orteils, constituant ainsi le prototype de tous les vertébrés.


Fig. 53

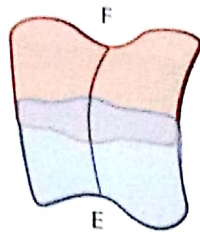
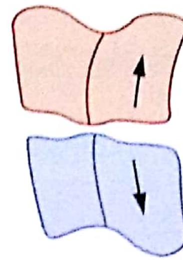
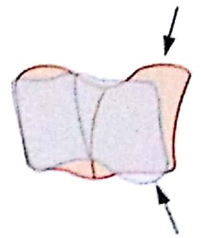


Fig. 54


Fig. 55


Fig. 56

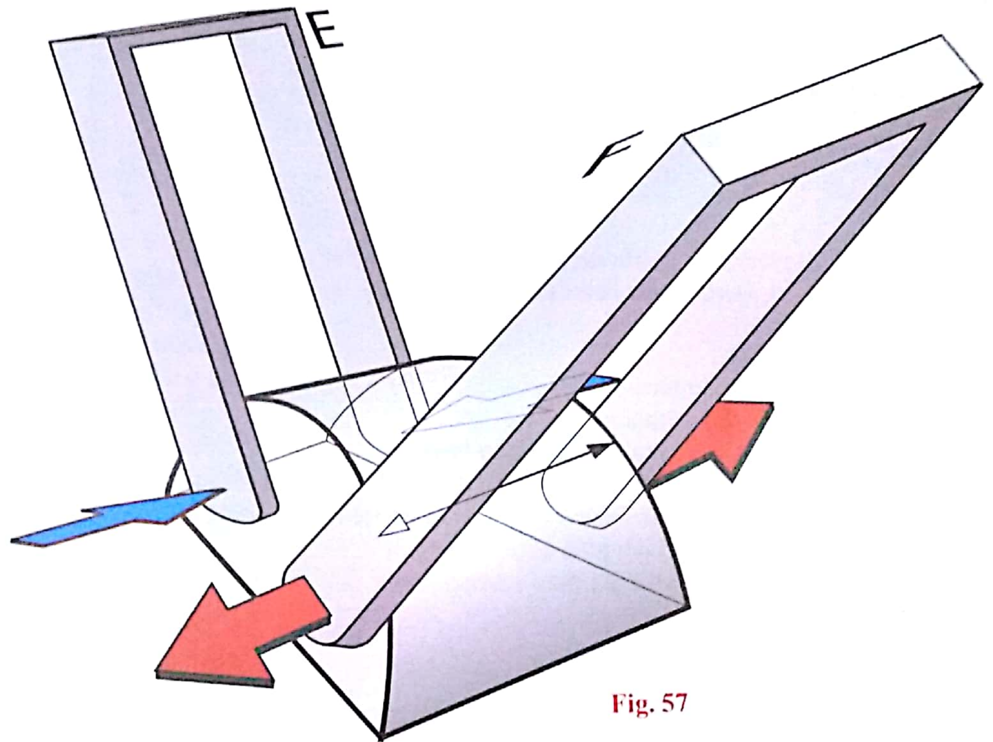


Fig. 57

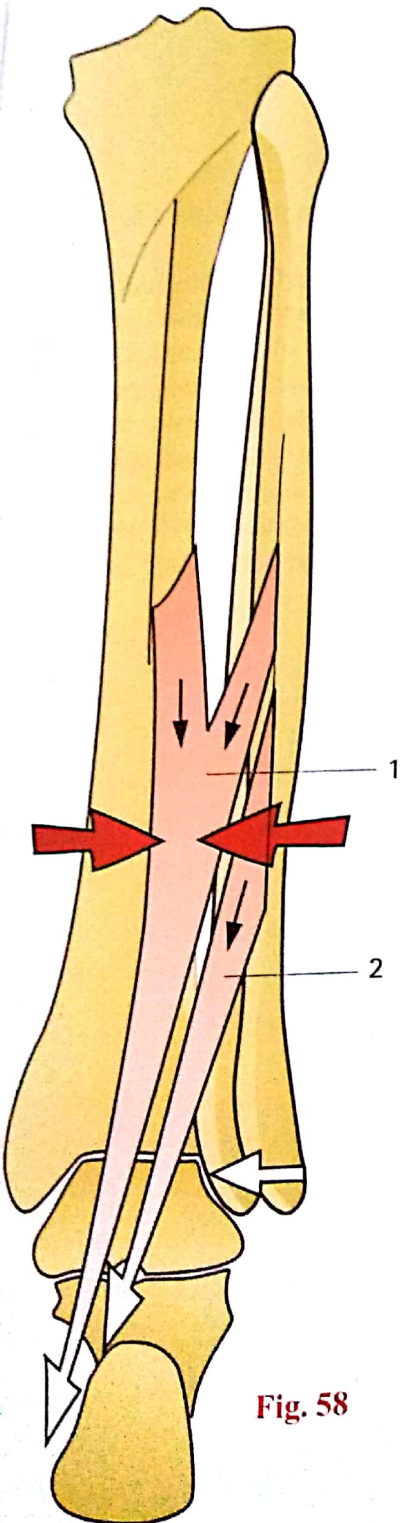


Fig. 58

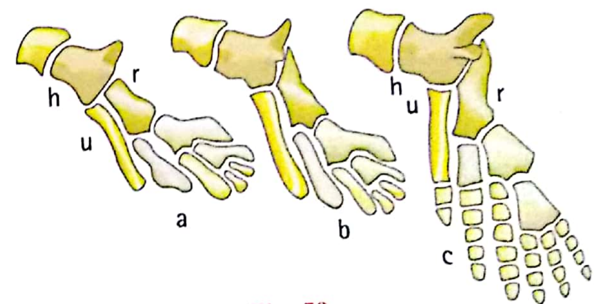


Fig. 59

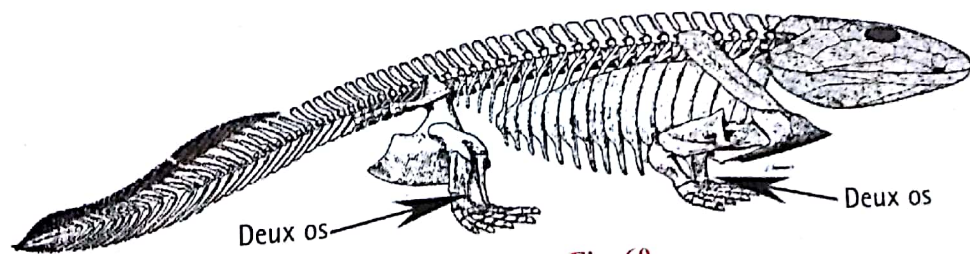


Fig. 60

Chapitre 4

LE PIED

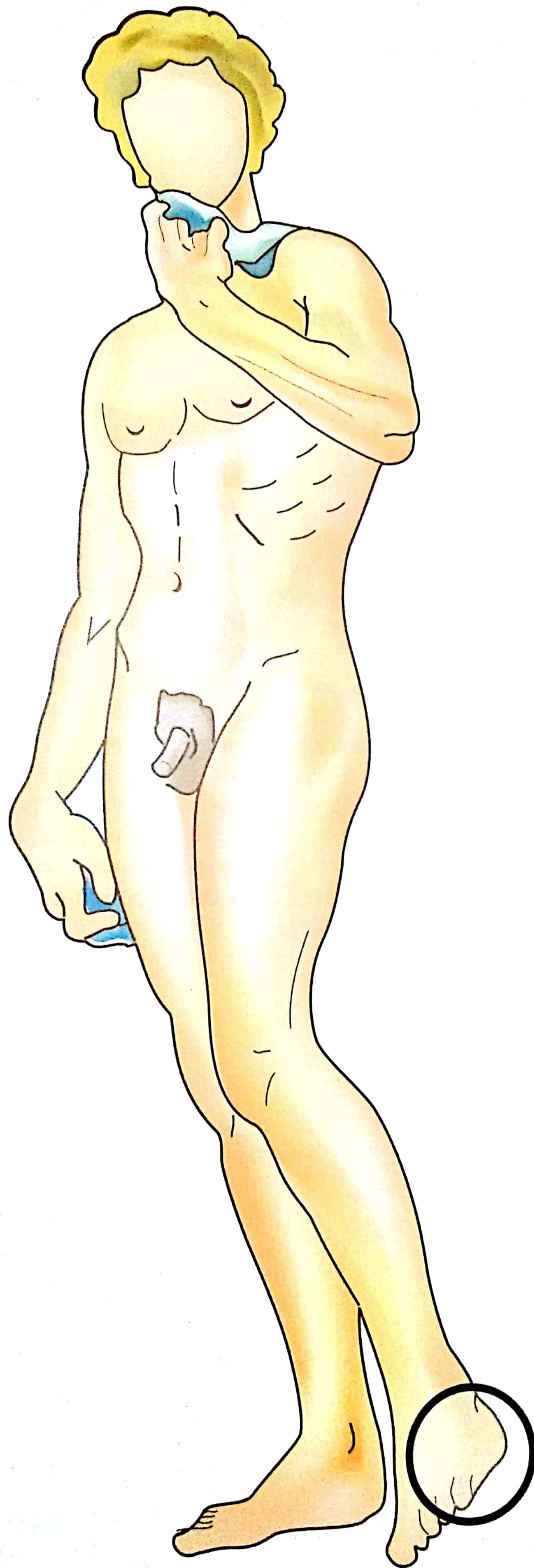
Les articulations du pied sont nombreuses et complexes ; elles mettent en rapport les os du tarse entre eux et avec ceux du métatarse. Ce sont :

- *l'articulation subtalaire ;*
- *l'articulation transverse du tarse ;*
- *l'articulation tarso-métatarsienne ;*
- *les articulations cuboïdo-naviculaire et cunéo-naviculaire.*

Ces articulations ont un double rôle :

- **orienter le pied** par rapport aux deux autres axes (l'orientation dans le plan sagittal étant dévolue à l'articulation talo-crurale) pour présenter la plante du pied correctement par rapport au sol quelles que soient la position de la jambe et l'inclinaison du terrain ;
- **modifier la forme et la courbure de la voûte plantaire** pour adapter le pied aux inégalités de terrain et aussi créer, entre le sol et la jambe transmettant le poids du corps, un *système amortisseur*, procurant au pas élasticité et souplesse.

Le rôle de ces articulations est donc capital. Par contre, les articulations des orteils, métatarso-phalangiennes et interphalangiennes sont *beaucoup moins importantes que leurs équivalents à la main.* L'une d'elles cependant joue un rôle essentiel dans le déroulement du pas : l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux.



Les mouvements de rotation longitudinale et de latéralité du pied

Outre les mouvements de flexion-extension, dont le siège est, nous l'avons vu, l'articulation talo-crurale, le pied peut encore effectuer des mouvements autour de l'**axe vertical de la jambe** (**axe Y**, p. 159) et autour de son **axe horizontal et longitudinal** (**axe Z**).

Autour de l'**axe vertical Y**, s'effectuent, dans le plan horizontal, à partir de la position normale (**Fig. 1 : pied de face**), les mouvements d'**adduction-abduction** :

- pour l'**adduction** (**Fig. 2**) : lorsque la pointe du pied se porte en dedans, vers le plan de symétrie du corps ;
- pour l'**abduction** (**Fig. 3**) : quand la pointe du pied se tourne en dehors et s'éloigne du plan de symétrie.

L'**amplitude totale des mouvements d'adduction-abduction** exécutés uniquement dans le pied est de 35° (Roud) à 45°. Cependant, ces mouvements de la pointe du pied dans le plan horizontal peuvent être le fait de la rotation externe-interne de la jambe (genou fléchi) ou de la rotation de tout le membre inférieur partant de la hanche (genou étendu). Ils sont alors beaucoup plus amples, pouvant atteindre 90° dans chaque sens chez les danseuses classiques.

Autour de l'**axe longitudinal Z**, le pied tourne de telle sorte que la plante s'oriente :

- soit vers le dedans (**Fig. 4**) : par analogie avec le membre supérieur, on définit ce mouvement comme une **supination** ;
- soit vers le dehors (**Fig. 5**), et l'on parle de **pronation**.

L'amplitude de la **supination**, qui est de 52° (Biesalski et Mayer, 1916), est plus grande que celle de la **pronation**, qui est de 25-30°.

Nous venons de définir par abduction-adduction et pronation-supination des mouvements qui, en réalité, n'existent pas à l'état pur au niveau des seules articulations du pied. En effet, nous verrons que ces articulations sont ainsi faites qu'un mouvement dans l'un des plans s'accompagne obligatoirement d'un mouvement dans les deux autres plans. Ainsi, *l'adduction s'accompagne nécessairement* (**Fig. 2 et 4**) *d'une supination et d'une légère extension*. Ces trois composantes caractérisent la **position dite d'inversion**. Si l'extension est annulée par une flexion équivalente de la cheville, on obtient l'attitude dite de **varus**. Enfin si une rotation externe dans le genou compense l'adduction, on observe alors seulement un *mouvement apparemment pur de supination*.

Dans l'autre sens (**Fig. 3 et 5**), *l'abduction s'accompagne nécessairement de pronation et de flexion* : c'est la **position dite d'éversion**. Si la flexion est annulée par une extension équivalente de la cheville (sur ces figures, elle est hypercompensée en extension), on obtient l'attitude en **valgus**. Si, en outre, une rotation interne dans le genou masque l'abduction, on observe un *mouvement de pronation apparemment pur*.

Ainsi, sauf compensation intervenant hors des articulations du pied, l'adduction ne pourra jamais être associée à une pronation et, vice-versa, l'abduction ne pourra jamais se composer avec une supination. **Il existe donc des combinaisons interdites par la construction même des articulations du pied**.

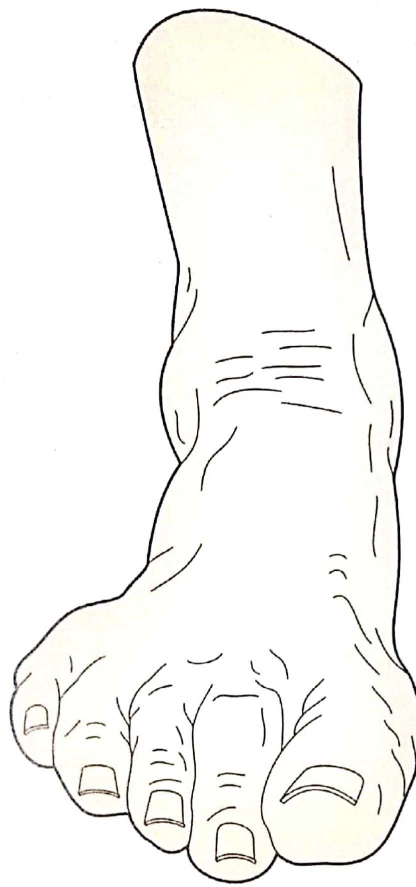


Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4

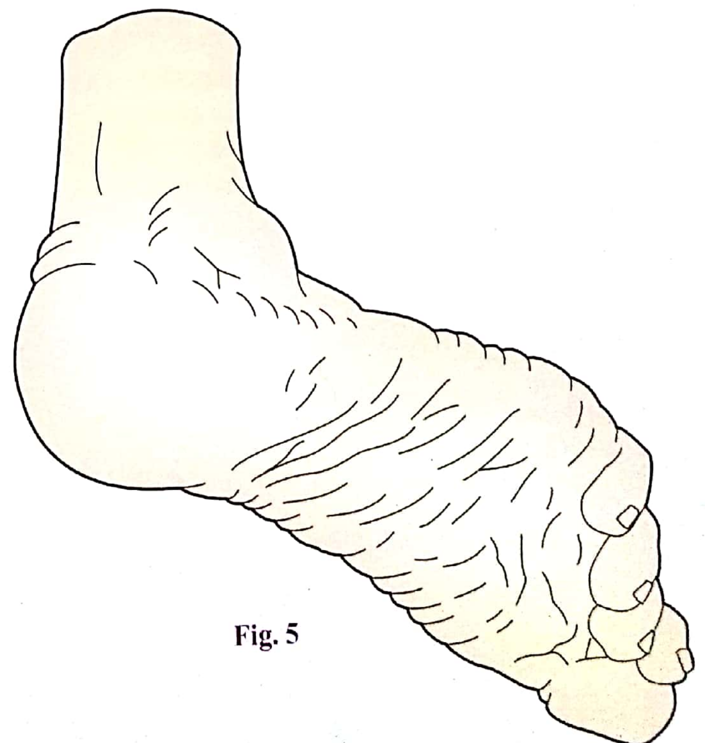


Fig. 5

Les surfaces articulaires de l'articulation subtalaire

Le talus vu par sa face inférieure **A** (**Fig. 6 : le talus a été séparé du calcanéus et retourné autour de l'axe xx' formant charnière**) s'articule à la face supérieure **B** du calcanéus. Ces deux os entrent en contact chacun par deux surfaces articulaires, qui constituent l'articulation subtalaire :

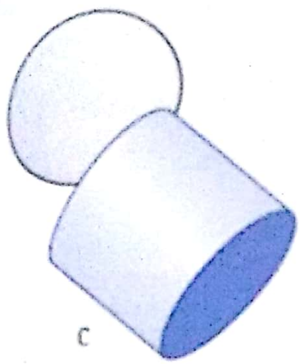
- la **surface articulaire talaire postérieure a** s'applique sur la **grande surface a'** située sur la face supérieure du calcanéus : c'est le thalamus de Destot. Ces deux surfaces sont unies par des ligaments et une capsule qui en font une articulation anatomiquement autonome ;
- la **petite surface b**, supportée par la face inférieure du col et de la tête du talus, vient reposer sur la **surface antérieure du calcanéus b'** obliquement allongée et supportée par le petit et le grand processus. Ces deux surfaces talaire et calcanéenne font anatomiquement partie d'une articulation plus vaste qui comporte en outre la face postérieure du scaphoïde **d'** et qui constitue avec la tête du talus **d** la **partie interne de l'articulation transverse du tarse**.

Avant d'envisager le fonctionnement de ces articulations, il est indispensable de comprendre la forme de leurs surfaces. Ce sont des **arthrodies.**

- Le **thalamus a'** est une surface ovalaire à grand axe oblique en avant et en dehors, *convexe* suivant ce grand axe (**Fig. 7 : vue externe et Fig. 8 : vue interne**) et *rectiligne* ou légèrement concave suivant la direction perpendiculaire. On peut donc l'assimiler à un segment de cylindre **f** dont l'axe serait *oblique d'arrière en avant, de dehors en dedans et légèrement de haut en bas.*
- La **surface talaire a** qui lui est opposée possède elle aussi cette forme cylindrique, de même rayon et de même axe, mais c'est un segment de cylindre creux (**Fig. 7**), alors que le thalamus est un segment de cylindre plein ;
- globalement, **la tête du talus est pseudo-sphérique** et les méplats qui la marquent peuvent être considérés comme des *facettes taillées sur une sphère* (**ligne tirets rouge**) de centre **g** (**Fig. 6 B**). De fait, la surface antérieure du calcanéus **b'** est *concave dans les deux sens*, tandis que la surface talaire **b** qui lui est opposée est *convexe dans les deux sens* avec les mêmes rayons de courbure. Très souvent, la surface calcanéenne **b'** est resserrée à sa partie moyenne, en forme de semelle (**Fig. 6 B**) et parfois même elle est subdivisée en deux facettes (**Fig. 7 et 8**) : l'une **e'** est supportée par le petit processus, et l'autre **b'** par le grand processus. On a remarqué que la stabilité du calcanéus est proportionnelle à la surface de cette dernière facette. Sur le talus, on retrouve cette subdivision **b** et **e**. La face antérieure du calcanéus est occupée par la surface articulaire **h** avec le cuboïde.

La **surface calcanéenne b' + e** fait elle-même partie d'une surface sphérique creuse plus vaste qui comprend en outre la surface postérieure du scaphoïde **d'** et la face supérieure du ligament glénoïdien **c'**, qui s'étend entre ces deux surfaces. Avec le **ligament deltoïde 5** et la capsule, ces surfaces forment une *cavité de réception sphérique* pour la tête du talus. Sur la tête du talus (**Fig. 6 A**), on retrouve les facettes correspondantes : la majeure partie de la surface **d** est reçue par le scaphoïde ; entre cette surface **d** et la facette calcanéenne **b** s'intercale un champ triangulaire **c** à base interne, qui correspond au **ligament glénoïdien c'**.

Cette association dans une même articulation de *deux types de surfaces de nature différente* (**Fig. 6 C**), à savoir une sphère et un cylindre, est un exemple de la nature très spéciale de la biomécanique, car ce type d'articulation ne peut avoir qu'*une seule position de congruence des surfaces articulaires*, la position d'appui, où *les pressions se transmettent intégralement*. Dans les autres cas, qui ne sont pas des positions d'appui, il existe un **jeu mécanique important et obligatoire**, par non-coïncidence des surfaces, ce qui n'a pas grande importance sur le plan mécanique, *puisqu'il n'y a pas transmission de contraintes*. C'est une illustration de ce qu'on pourrait appeler la **mécanique floue**, par rapport à la mécanique industrielle qui est précise et ajustée.



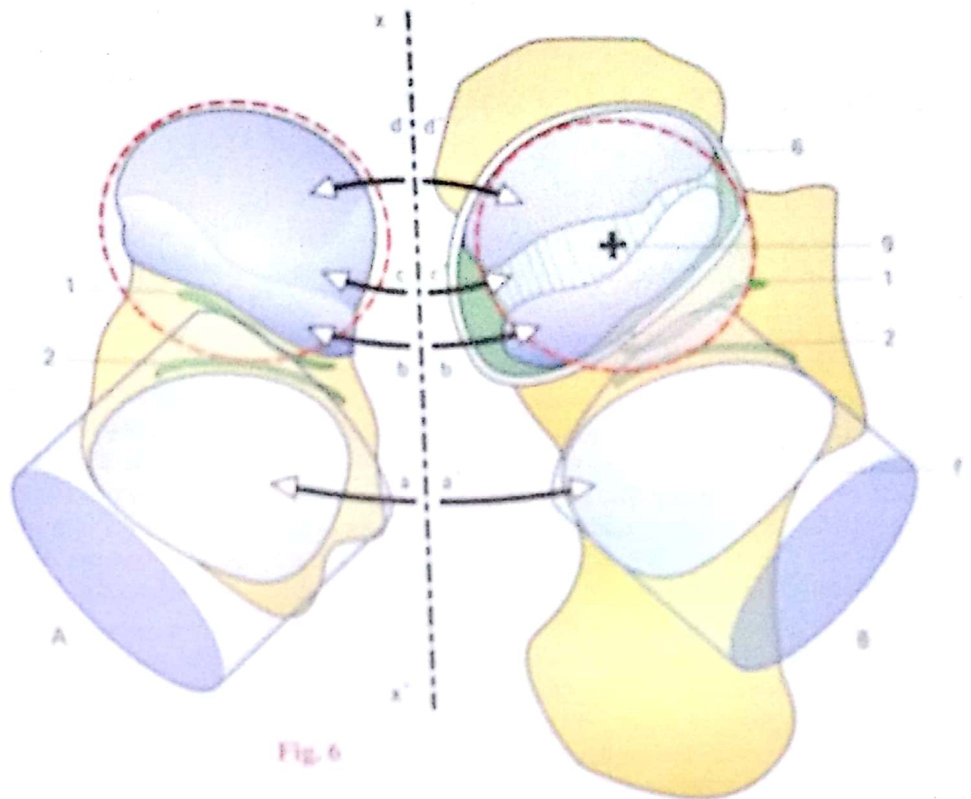


Fig. 6

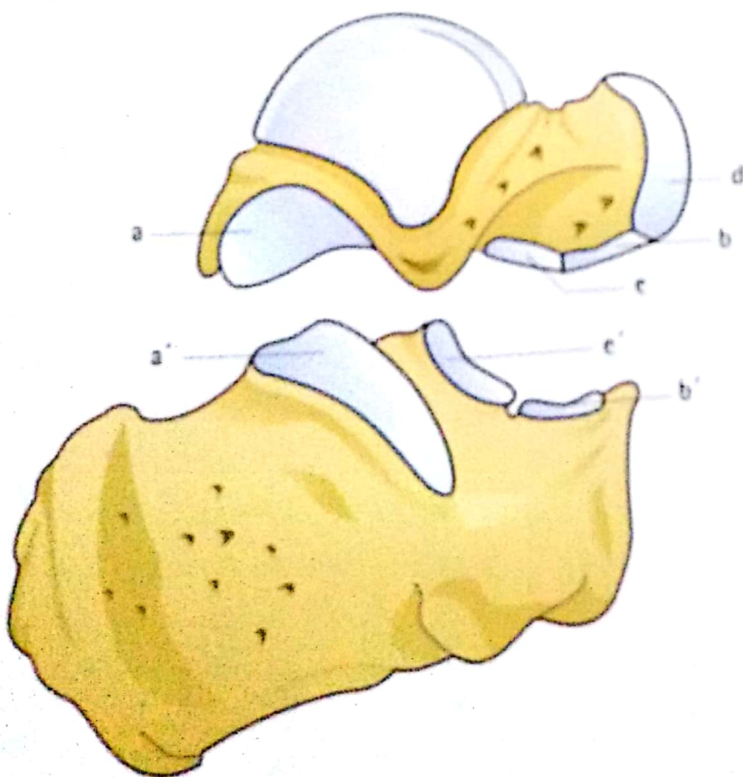


Fig. 7

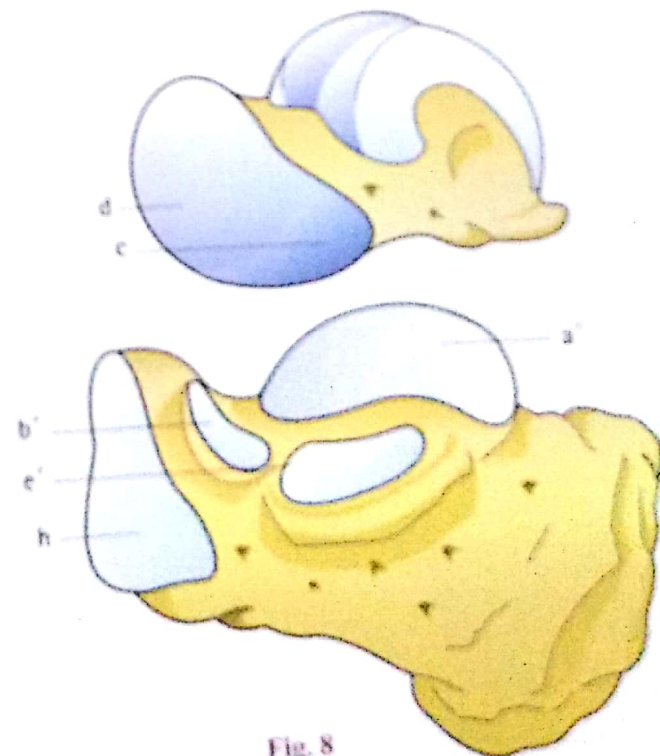


Fig. 8

Congruence et incongruence de l'articulation subtalaire

La description de la page précédente permet de comprendre la disposition et la correspondance des surfaces articulaires, mais pas de saisir leur mode de fonctionnement très particulier. Pour cela, il est nécessaire d'affiner la description des surfaces de l'**articulation subtalaire antérieure** figurée ici ouverte **(Fig. 9 : face inférieure du talus)**, le talus, retourné à côté du calcanéus **(Fig. 10 : face supérieure du calcanéus)** comme les pages d'un livre ouvert (**xx'** : axe de rotation).

Sur la **face inférieure du col du talus (Fig. 9)**, la facette **b** correspond à la facette **b'** située sur la **face supérieure du calcanéus (Fig. 10)** au niveau du petit processus. Sur la **tête du talus (Fig. 9)**, on retrouve le champ scaphoïdien **e** et le champ glénoïdien **d**. Par contre, la partie cartilagineuse située en dehors du champ glénoïdien est subdivisée en **trois facettes** : de dedans en dehors **Cl**, **C2** et **C3**, qui correspondent globalement à la facette de la face supérieure du grand processus du calcanéus **(Fig. 10)**, elle-même subdivisée en **deux facettes**, de dehors en dedans **C'1** et **C'2**. En arrière, on retrouve les deux surfaces de l'articulation subtalaire postérieure : le **thalamus a'** et la **surface inférieure du corps du talus a**.

Il n'existe qu'une seule position de congruence de l'articulation subtalaire : la **position moyenne**. Le pied est en rectitude sous le talus, c'est-à-dire sans inversion, ni éversion ; c'est la position qu'adopte un pied normal (ni plat, ni creux) en orthostatisme sur un plan horizontal, à l'arrêt, en appui symétrique. Les surfaces articulaires de l'articulation subtalaire postérieure *se correspondent alors parfaitement* : la facette **b** du col du talus repose sur la facette **b'** du petit processus du calcanéus et la facette moyenne **C2** de la tête du talus s'appuie sur la facette horizontale **C'1** du grand processus. Cette position de rectitude, dans laquelle les surfaces sont appliquées les unes sur les autres par la pesanteur, et non par les ligaments, est **stable** et peut être conservée longtemps, grâce à la congruence. **Toutes les autres positions sont instables et entraînent une incongruence plus ou moins marquée.**

Dans le **mouvement d'éversion**, l'extrémité antérieure du calcanéus **(Fig. 11 : vue supérieure côté droit, le talus – en bleu – étant supposé transparent)** se déplace en dehors et tend à se « coucher » **(Fig. 12 : vue antérieure)** sur sa face interne. Dans ce mouvement, **les deux facettes b** et **b'** restent au contact l'une de l'autre, formant ainsi un **pivot**, tandis que la surface subtalaire **a** glisse en bas et en avant sur le thalamus **a'**, venant buter sur le plancher du sinus du tarse ; la partie postéro-supérieure du thalamus est « découverte ». Tout en avant, la **petite facette talaire C3** glisse au contact **(Fig. 12)** de la facette oblique **C'2** du calcanéus. Pour cette raison, ces deux facettes **C2** et **C'2** peuvent être appelées « **facettes d'éversion** ».

Lors du **mouvement d'inversion**, le calcanéus subit un déplacement inverse : extrémité antérieure *vers le dedans* **(Fig. 13)** et tendance à se « *coucher* » sur sa face externe **(Fig. 14)**. **Les deux facettes-pivots restent au contact** ; la grande surface subtalaire **a** « *remonte* » sur le thalamus **a'**, découvrant sa partie antéro-inférieure ; en avant, la facette d'inversion **Cl** du talus vient reposer sur la facette horizontale **C'l** du grand porcessus du calcanéus **(Fig. 14)**.

Ces deux positions sont donc, à l'évidence, **instables**, **incongruentes**, sollicitant ainsi au maximum les ligaments. **Elles ne peuvent être que transitoires**.

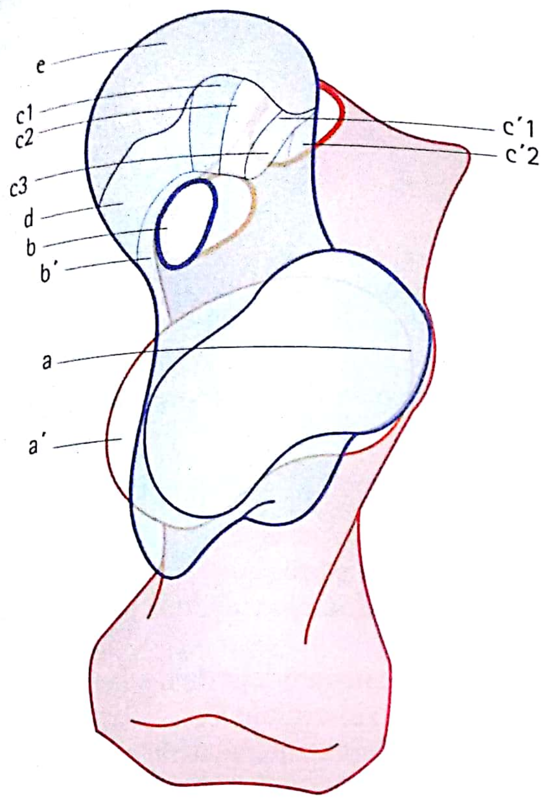


Fig. 11

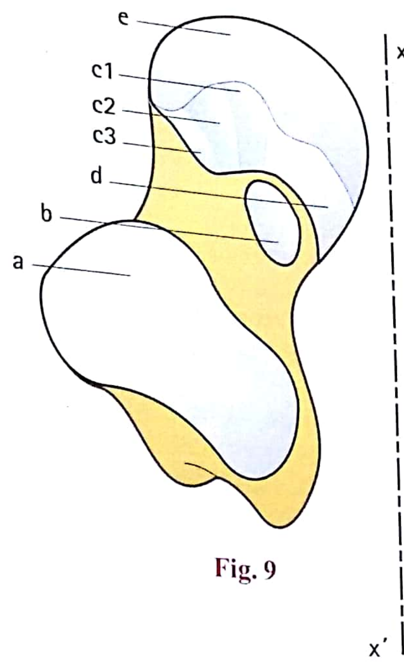


Fig. 9

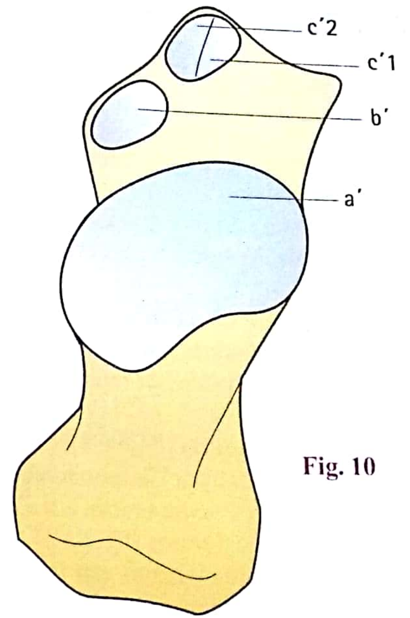


Fig. 10

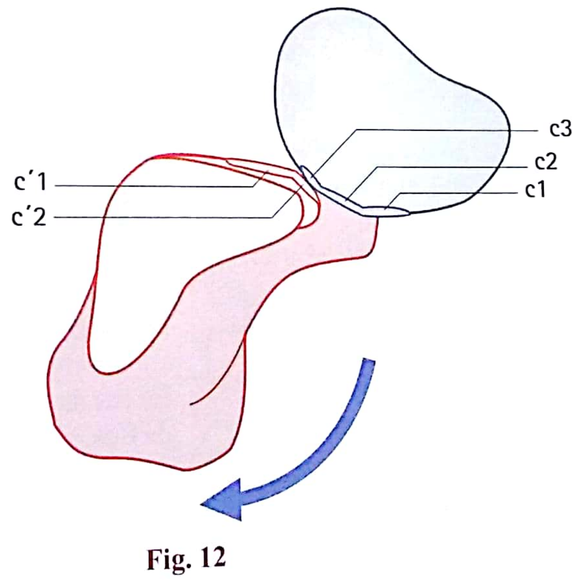


Fig. 12

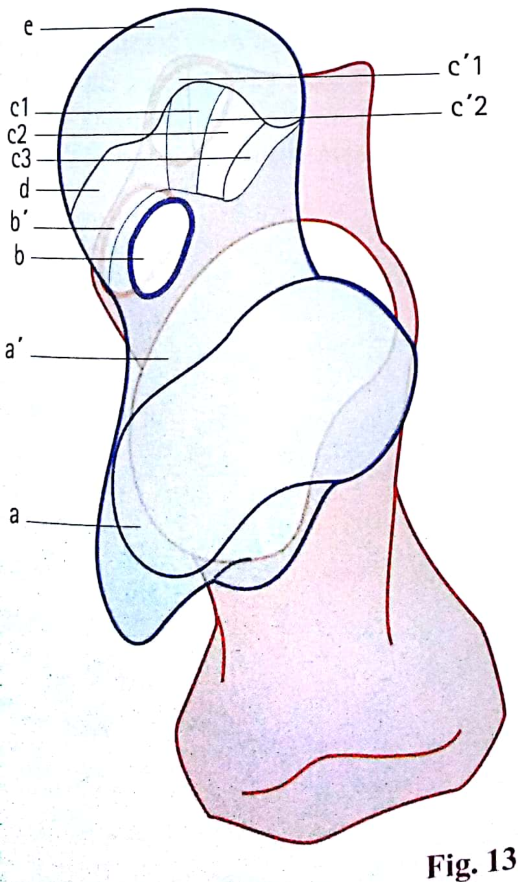


Fig. 13

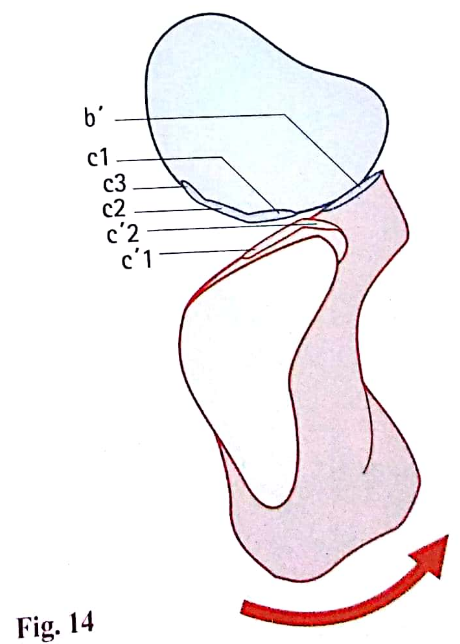


Fig. 14

Le talus, os singulier

Dans la structure du tarse postérieur, le talus est un os singulier à trois points de vue.

D'abord, situé au sommet du tarse postérieur, c'est l'**os répartiteur du poids** du corps et des efforts sur l'ensemble du pied **(Fig. 15)**.

Par l'intermédiaire de sa **face articulaire supérieure**, la trochlée, il reçoit le poids du corps **(flèche 1)** et les efforts transmis par la pince bi-malléolaire, et répartit ces contraintes dans trois directions ;

- **vers l'arrière**, le talon **(flèche 2)**, c'est-à-dire la grosse tubérosité du calcanéus, par l'intermédiaire de l'articulation talo-calcanéenne postérieure (surface thalamique du talus) ;
- **vers l'avant et le dedans (flèche 3)**, en direction de l'arche interne de la voûte plantaire, par l'intermédiaire de l'articulation talo-scaphoïdienne ;
- **vers l'avant et le dehors (flèche 4)**, en direction de l'arche externe de la voûte plantaire, par l'intermédiaire de l'articulation talo-calcanéenne antérieure.

Il « travaille » en compression et son rôle mécanique est considérable.

Ensuite, il ne comporte **aucune insertion musculaire (Fig. 16)** : tous les muscles qui viennent de la jambe passent en pont autour de lui, ce qui peut lui valoir le surnom d'**os « encagé »**, c'est à dire contenu dans une cage de tendons. Au nombre de treize, ce sont :

- les quatre tendons du long extenseur des orteils **1** ;
- le troisième fibulaire, il est inconstant **2** ;
- le court fibulaire **3** ;
- le long fibulaire **4** ;
- le tendon calcanéen, terminaison du triceps sural **5** ;
- le tibial postérieur **6** ;
- le long fléchisseur de l'hallux **7** ;
- le long fléchisseur des orteils **8** ;
- le long extenseur de l'hallux **9** ;
- le tibial antérieur **10**.

Enfin, il est entièrement **couvert de surfaces articulaires** et d'**insertions ligamentaires**, ce qui peut le faire surnommer l'**os relais**. On distingue :

- le ligament interosseux **1** ;
- le ligament talo-calcanéen externe **2** ;
- le ligament talo-calcanéen postérieur **3** ;
- le faisceau antérieur du ligament collatéral latéral de l'articulation talo-crurale **4** ;
- le plan profond du faisceau antérieur du ligament collatéral médial de l'articulation talo-crurale **5** ;
- le faisceau postérieur du ligament collatéral médial de l'articulation talo-crurale **6** ;
- le faisceau postérieur du ligament collatéral latéral de l'articulation talo-crurale **7** ;
- la capsule antérieure de l'articulation talo-crurale avec son renforcement **8** ;
- le renforcement postérieur de la capsule de l'articulation talo-crurale **9** ;
- le ligament talo-scaphoïdien **10**.

Ne comportant aucune insertion musculaire, le talus est « nourri » uniquement par les vaisseaux lui parvenant par les insertions ligamentaires, et quelques vaisseaux directs, ce qui constitue un apport artériel *tout juste suffisant dans les conditions normales*.

En cas de fracture du col du talus, surtout avec luxation du corps de l'os, sa trophicité, sa survie au plan vasculaire, peut être irrémédiablement compromise ce qui entraîne une **pseudarthrose du col** ou pire encore, une **nécrose aseptique** du corps de l'os.

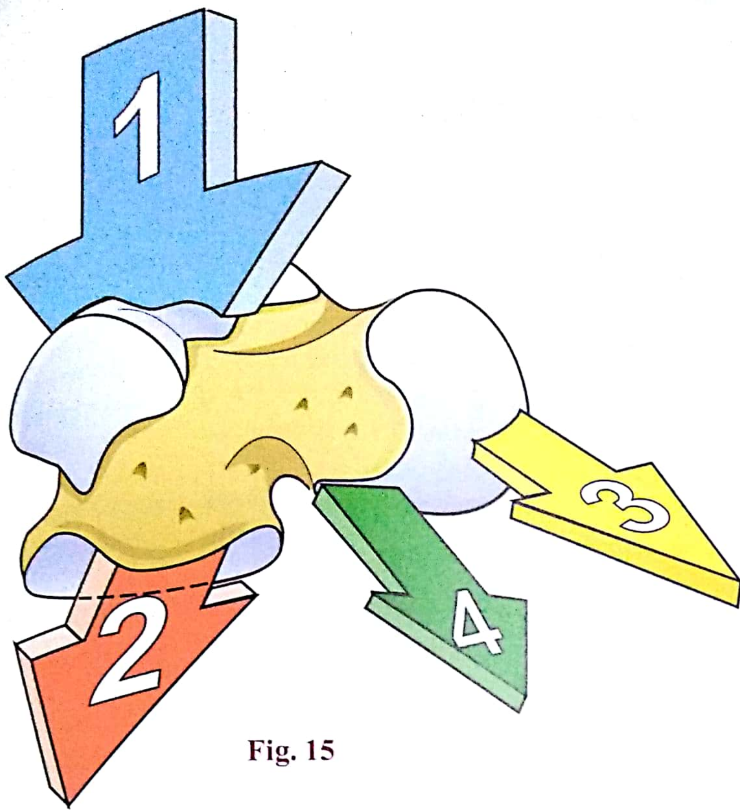


Fig. 15

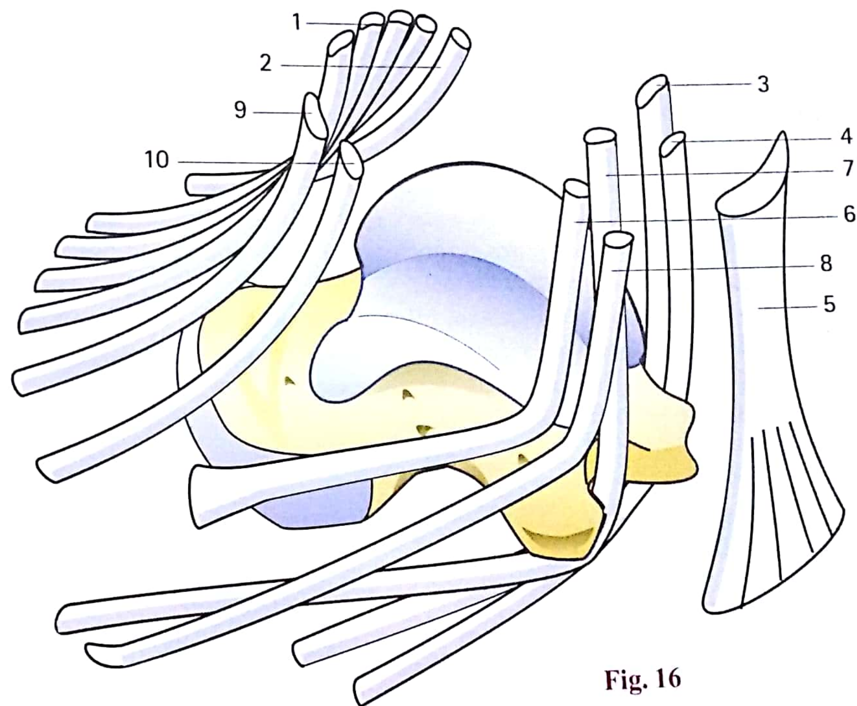


Fig. 16

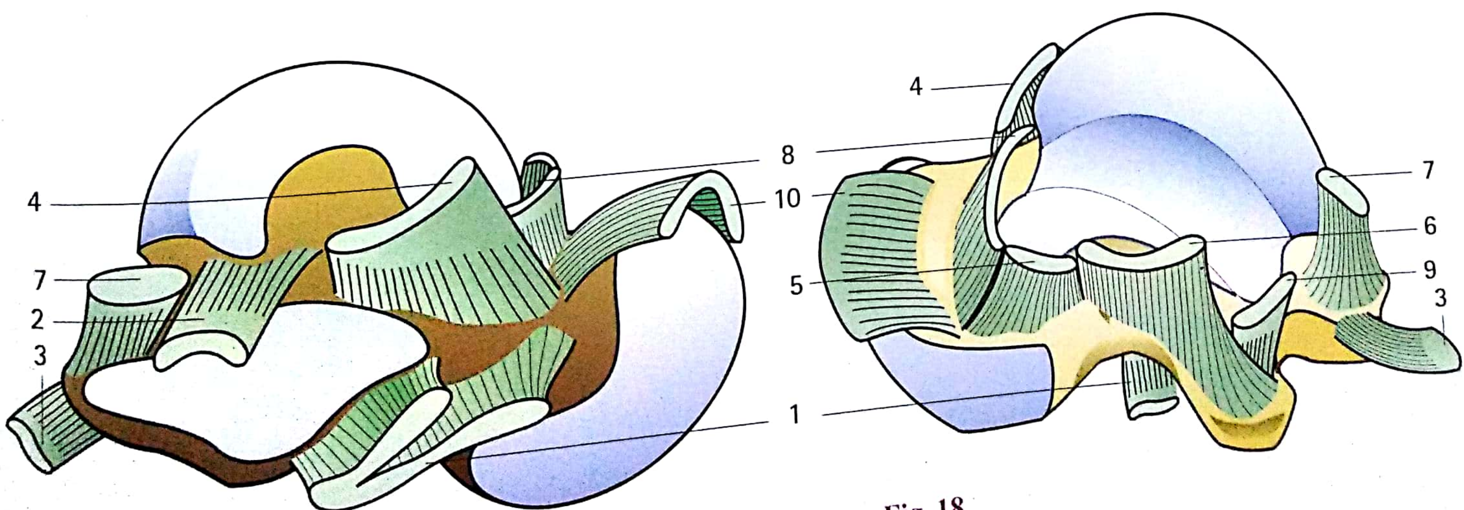


Fig. 17

Fig. 18

Les ligaments de l'articulation subtalaire

Le talus et le calcanéus sont réunis par des *ligaments courts et puissants*, car ils supportent des efforts considérables lors de la marche, de la course et du saut.

Le système principal est formé par le **ligament talo-calcanéen interosseux (Fig. 19 : vue antéro-externe)**, encore appelé « haie interosseuse », constitué de **deux nappes fibreuses** trapues et quadrilatères, occupant le sinus du tarse. On appelle ainsi un espace assez large situé entre la face inféro-externe du col du talus et la face supérieure de la moitié antérieure du calcanéus.

- Le **faisceau antérieur 1** s'insère dans la rainure calcanéenne, qui constitue le plancher du sinus du tarse, juste au-dessus du grand processus. Ses fibres denses et nacrées se dirigent *obliquement en haut, en avant et en dehors* pour se fixer sur la rainure talaire, située à la face inférieure du col du talus, qui forme le plafond du sinus du tarse (voir **Fig. 6 A**), immédiatement en arrière de la surface cartilagineuse de la tête.
- Le **faisceau postérieur 2** s'insère en arrière du précédent, sur le plancher du sinus, juste en avant du thalamus. Ses fibres, tout aussi épaisses, *obliques en haut, en arrière et en dehors*, vont s'ancrer au plafond du sinus (voir **Fig. 6 A**), juste en avant de la surface postérieure du talus.

La disposition des faisceaux du ligament interosseux apparaît nettement lorsqu'on écarte le talus du calcanéus en *supposant les ligaments élastiques* **(Fig. 20 : vue antéro-externe avec ligaments exagérément extensibles)**.

Le talus est encore réuni au calcanéus par deux autres ligaments moins importants **(Fig. 19 et 20)** :

- le **ligament talo-calcanéen latéral 3**, qui s'attache sur le processus externe du talus et, après un trajet oblique en bas et en arrière, parallèle au faisceau moyen du ligament collatéral latéral de l'articulation talo-crurale, se termine sur la face externe du calcanéus ;
- le **ligament talo-calcanéen postérieur 4**, mince bandelette tendue du tubercule postéro-externe du talus à la face supérieure du calcanéus.

Le ligament interosseux joue un **rôle essentiel dans la statique et la dynamique** de l'articulation subtalaire. Il occupe, en effet, une position centrale comme le montre un schéma **(Fig. 21 : vue supérieure des quatre os du tarse)** où l'on a posé une trochlée du talus supposée transparente sur les surfaces calcanéennes. On se rend ainsi compte que le poids du corps, transmis par le squelette jambier sur la trochlée du talus, se répartit sur le thalamus et sur les surfaces antérieures du calcanéus : la surface antéro-interne **b'1** et l'antéro externe **b'2**. On constate aussi que le ligament talo-calcanéen interosseux visible en transparence (deux lignes vertes) est situé exactement dans le prolongement de l'axe jambier **(croix cerclée)**, ce qui explique qu'**il travaille autant en torsion qu'en élongation** (voir p. 198).

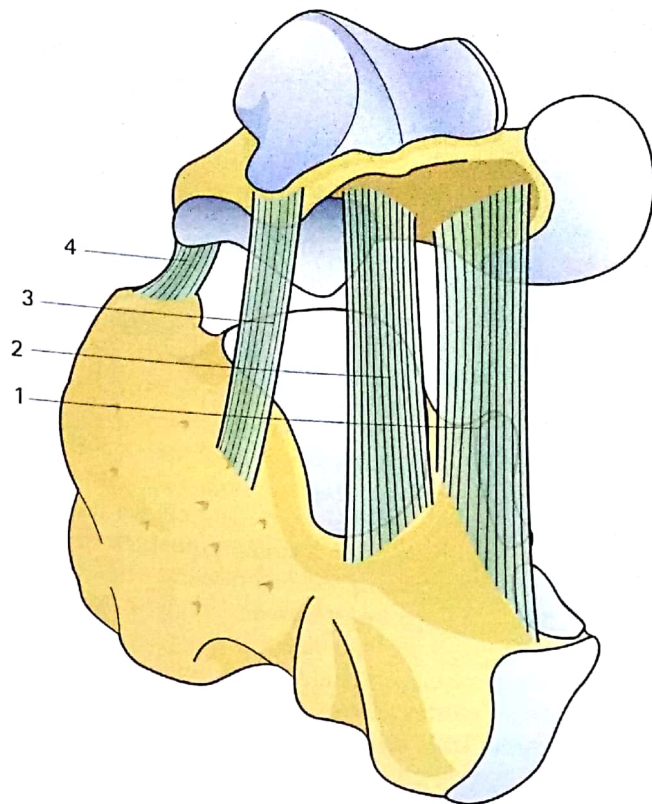


Fig. 20

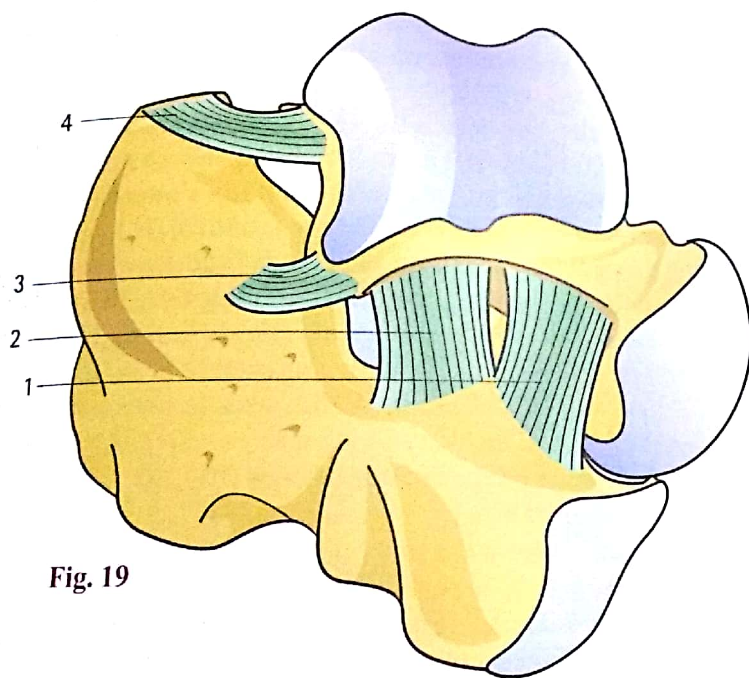


Fig. 19

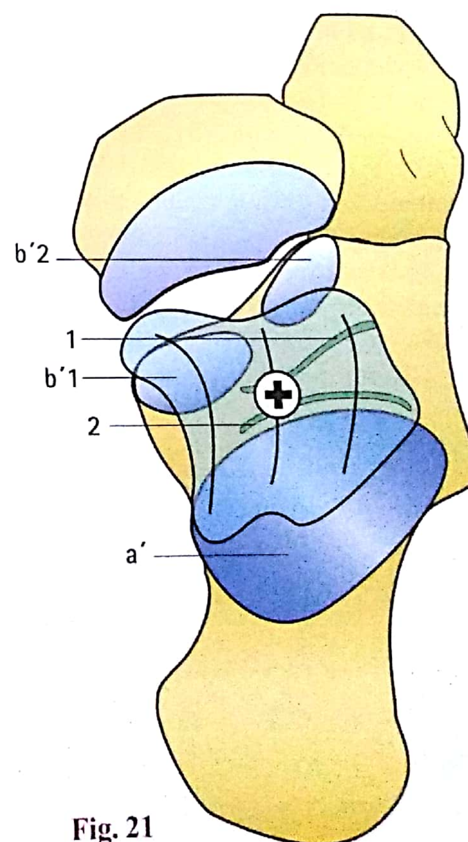


Fig. 21

Les légendes sont communes aux figures de la page précédente.

L'articulation transverse du tarse et ses ligaments

Sur une **vue antérieure ouverte (Fig. 22, d'après Rouvière)**, le couple scaphoïde-cuboïde ayant été basculé vers le bas, l'articulation transverse du tarse droite apparaît composée de deux parties : l'**interligne talo-scaphoïdien**, concave en arrière, forme la partie interne (voir Fig. 6 B, p. 183) alors que la partie externe est constituée par l'**interligne calcanéo-cuboïdien**, légèrement concave en avant, si bien que vu par sa face supérieure l'articulation transverse du tarse forme un *S* italique transversal.

La **surface antérieure du calcanéus** e a une forme complexe : dans le sens transversal, elle est *concave dans sa partie haute et convexe dans sa partie inférieure* ; de haut en bas, elle est *d'abord concave puis convexe*. La **surface postérieure du cuboïde e'**, qui lui est opposée, est inversement conformée, mais souvent **(Fig. 27 : vue postérieure du couple scaphoïde-cuboïde)**, elle se prolonge par une facette **e'2** sur le scaphoïde, qui repose par son extrémité externe sur le cuboïde. Le contact s'effectue par **deux facettes planes h** et **h'** et les deux os sont solidement réunis par **trois ligaments**, un dorsal externe **5**, un plantaire interne **6** et un interosseux **7**, court et très épais (ici les deux os ont été artificiellement écartés).

Les ligaments de l'articulation transverse du tarse sont au nombre de cinq :

- le **ligament glénoïdien** c', qui réunit calcanéus et scaphoïde **(Fig. 23)** et forme en même temps une surface articulaire (voir p. 183). Son bord interne **8** donne insertion à la base du ligament deltoïde (voir Fig. 16, p. 167) ;
- le **ligament talo-scaphoïdien supérieur 9**, étendu de la face dorsale du col du talus à la face dorsale du scaphoïde **(Fig. 26)** ;
- le **ligament bifurqué (Fig. 23 et 26)**, par sa position médiane, forme la clé de l'articulation. Il est constitué de **deux faisceaux** dont l'origine commune **10** se fixe sur la face dorsale du grand processus du calcanéus près de son bord antérieur. Le **faisceau interne** 11, ou calcanéo-scaphoïdien externe, s'étale dans un plan vertical pour s'insérer sur l'extrémité externe du scaphoïde, tandis que son bord inférieur vient parfois s'unir au ligament calcanéo-scaphoïdien inférieur, clivant ainsi l'articulation transverse du tarse en deux cavités synoviales distinctes. Le **faisceau externe 12**, ou calcanéo-cuboïdien interne, moins épais que le précédent, forme une lame horizontale qui se fixe sur la face dorsale du cuboïde. Les deux faisceaux du ligament bifurqué forment ainsi **(Fig. 25 : vue schématique antérieure)** un angle dièdre droit, ouvert en haut et en dehors ;
- le **ligament calcanéo-cuboïdien dorsal 13** est une mince bandelette **(Fig. 23 et 26)** étendue sur la face supéro-externe de l'articulation calcanéo-cuboïdienne ;
- le **ligament calcanéo-cuboïdien plantaire**, épais et nacré, s'étend sur la face inférieure des os du tarse. Il est constitué de deux couches distinctes :

– une **couche profonde 14 (Fig. 24 : vue inférieure, la couche superficielle a été coupée et réclinée)** unissant la tubérosité antérieure du calcanéus à la face inférieure du cuboïde juste en arrière de la gouttière où glisse le tendon du long fibulaire **LF** ;

– une **couche superficielle 15** fixée en arrière sur la face inférieure du calcanéus entre les tubérosités postérieures et la tubérosité antérieure ; cet éventail fibreux s'attache sur la face inférieure du cuboïde en avant de la gouttière du long fibulaire et ses expansions **16** se terminent sur la base des quatre derniers métatarsiens. Ainsi, la gouttière du cuboïde est-elle transformée en un canal ostéofibreux **17** parcouru par le long fibulaire, de dehors en dedans **(Fig. 24)**. Du côté interne passe le tendon du long fléchisseur de l'hallux **LFH,** sous le petit processus du calcanéus et sous le ligament glénoïdien. En faisant sur le tarse postérieur deux coupes paramédianes **(Fig. 28 : direction des deux plans de coupe)**, la vue interne **(Fig. 29 : partie externe de la coupe)** montre le tendon du long fibulaire se dégageant du cuboïde et les deux faisceaux du ligament talo-calcanéen, le faisceau antérieur **1** et le faisceau postérieur **2**. Le grand ligament calcanéo-cuboïdien plantaire, avec ses deux nappes fibreuses, la nape profonde **14** et la nappe superficielle **15**, est un des éléments essentiels de soutien de la voûte plantaire (voir Fig. 100, p. 219).

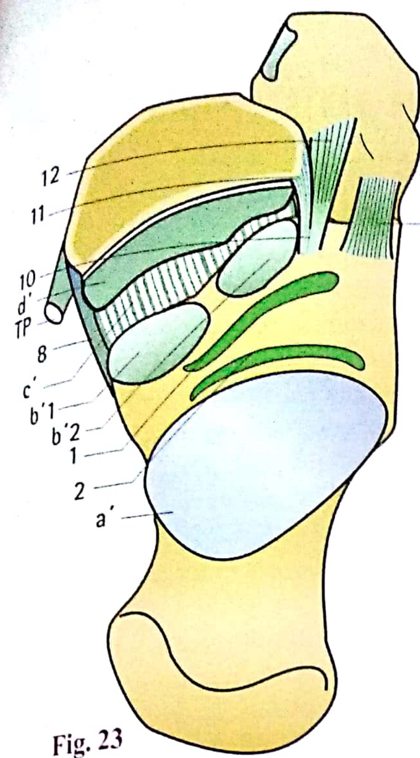


Fig. 23

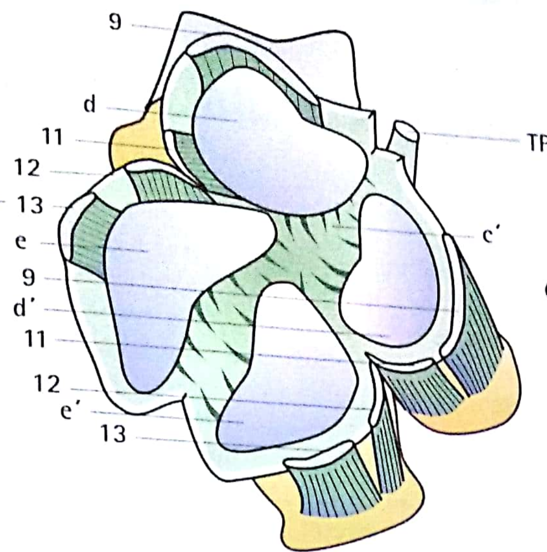


Fig. 22

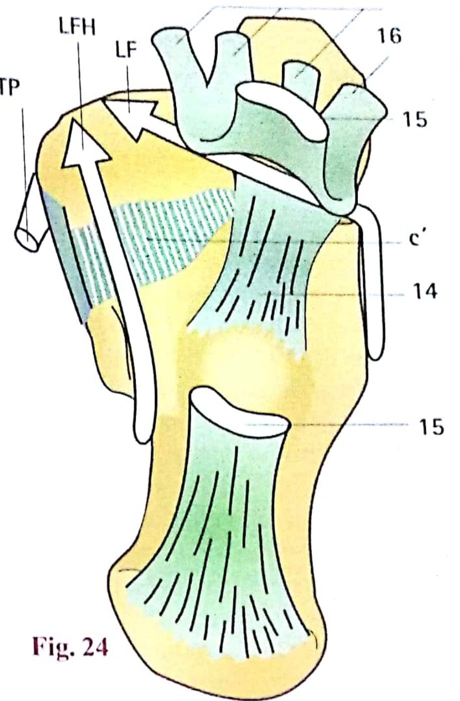


Fig. 24

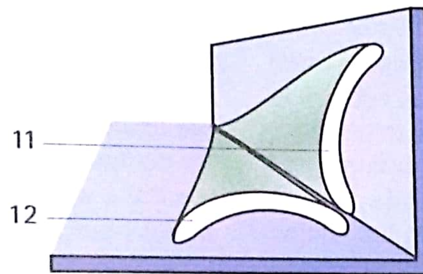


Fig. 25

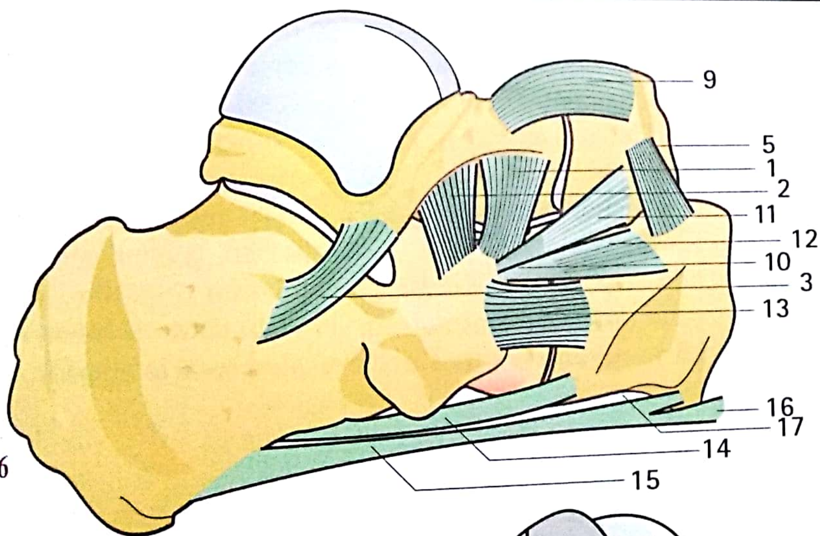


Fig. 26

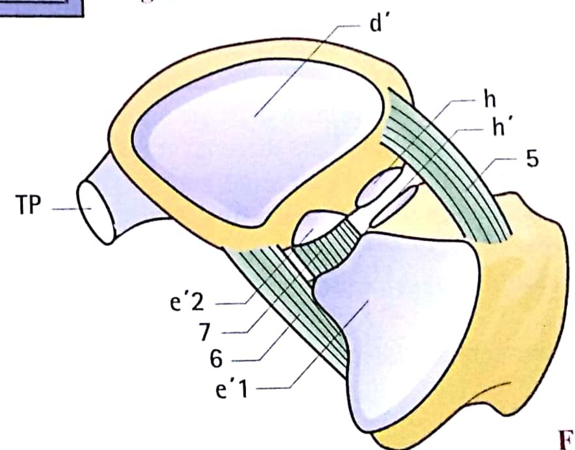


Fig. 27

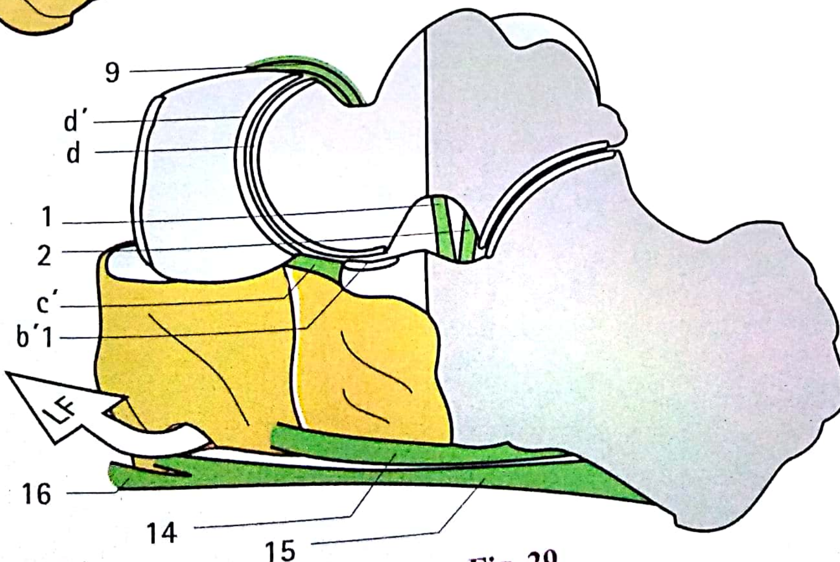
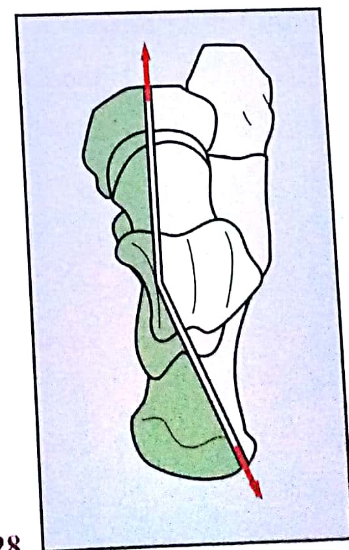


Fig. 29


Fig. 28

Les mouvements dans l'articulation subtalaire

Prise séparément, chacune des surfaces de l'articulation subtalaire peut être assimilée en gros à une surface géométrique : le thalamus est un *segment de cylindre*, la tête talaire un *segment de sphère*. Cependant, l'articulation subtalaire doit être comprise comme une arthrodie, car il est géométriquement impossible de faire glisser simultanément l'une sur l'autre deux surfaces sphériques et deux surfaces cylindriques associées dans le même ensemble mécanique sans que, dans l'un des couples au moins, n'apparaisse un bâillement, c'est-à-dire une **perte de contact** plus ou moins étendue entre les surfaces en regard. Le fonctionnement de cette articulation comporte donc « du jeu » et ceci de par sa construction même. Elle s'oppose ainsi à une articulation très serrée comme la hanche où les surfaces sont géométriques et concordantes et le jeu réduit au minimum.

Par contre, si les surfaces de l'articulation subtalaire sont assez exactement concordantes dans la position moyenne, celle où la plus grande surface de contact est nécessaire pour transmettre le poids du corps, elles deviennent franchement discordantes dans les positions extrêmes, ce qui réduit la surface de contact, mais alors les efforts à transmettre sont beaucoup plus faibles ou quasi nuls.

Partant de la **position moyenne (Fig. 30 : vue antérieure du couple calcanéus-talus transparent)**, le mouvement du calcanéus sous le talus supposé fixe s'effectue simultanément **dans les trois plans de l'espace**. Lors du mouvement d'inversion du pied (voir Fig. 2, p. 181), l'extrémité antérieure du calcanéus subit **trois déplacements élémentaires (Fig. 31, position initiale en tirets bleus)** :

- un abaissement léger **t** entraînant une légère extension du pied ;
- un déplacement en dedans **v** par adduction ;
- une rotation **r** : le calacanéus tend à se coucher sur sa face externe dans une composante de supination.

À noter que la même démonstration peut être faite en sens inverse lors du mouvement d'éversion.

Farabeuf a parfaitement décrit ce mouvement complexe en disant que « le calcanéus tangue, vire et roule sous le talus ». La comparaison avec un bateau est parfaitement imagée **(Fig. 34)**. À partir de la position stable **a** du bateau, si une vague survient :

- il **tangue**, son étrave plonge dans la vague **b**, cela s'appelle le **tangage** ;
- il **vire** en portant son étrave latéralement **c** ;
- il **roule** en s'inclinant sur un bord **d**, c'est le **roulis**.

Ces mouvements élémentaires autour des axes de tangage, de virage et de roulis sont d'ailleurs automatiquement associés lorsque le bateau « descend » obliquement à la vague **e**.

On démontre en géométrie qu'un mouvement dont on connaît les composantes élémentaires par rapport à trois axes *peut être ramené à un mouvement simple autour d'un seul axe oblique par rapport aux trois autres*. Dans le cas du calcanéus, schématisé ici sous la forme d'un parallélépipède **(Fig. 32)**, cet axe **mn** est oblique de haut en bas, de dedans en dehors et d'avant en arrière. La rotation autour de cet axe **mn (Fig. 33)** produit les déplacements précédemment décrits. Cet axe, mis en évidence par Henke, pénètre par la partie supéro-interne du col du talus, passe par le sinus du tarse et ressort par la tubérosité postéro-externe du calcanéus (voir p. 198 et aussi le modèle du pied en fin du volume). L'**axe de Henke** est, comme nous le verrons, non seulement l'axe de l'articulation subtalaire, mais encore celui de l'articulation transverse du tarse : **il conditionne tous les mouvements de l'arrière-pied sous la cheville**.



Fig. 30

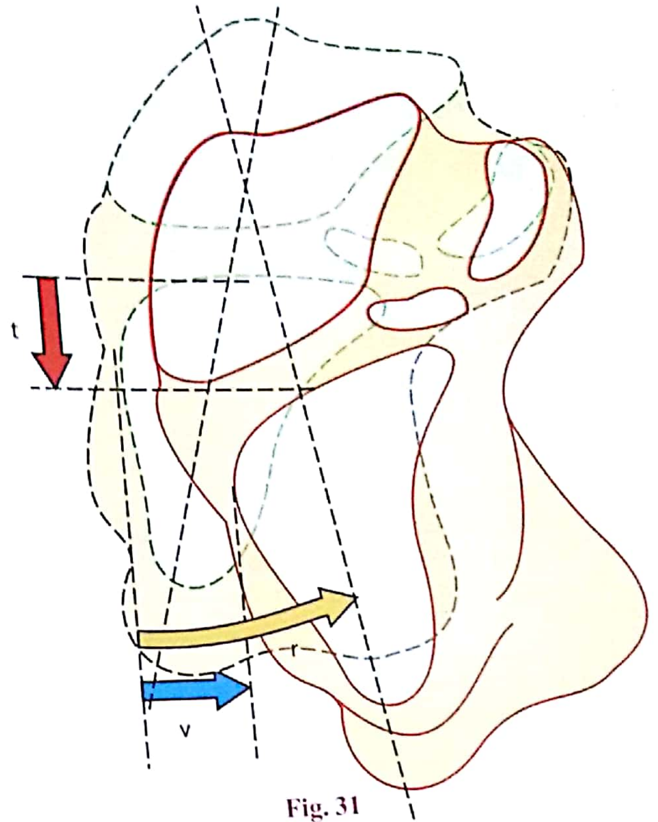


Fig. 31

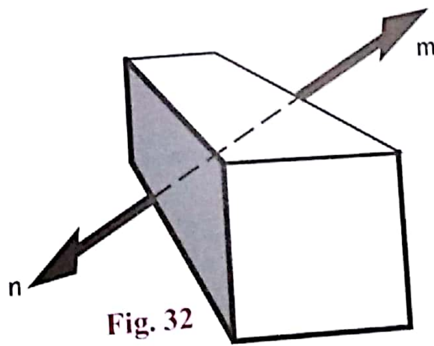


Fig. 32

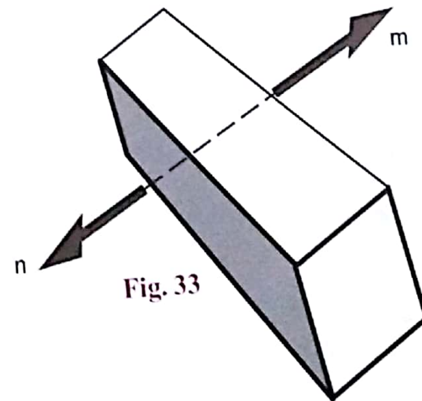


Fig. 33

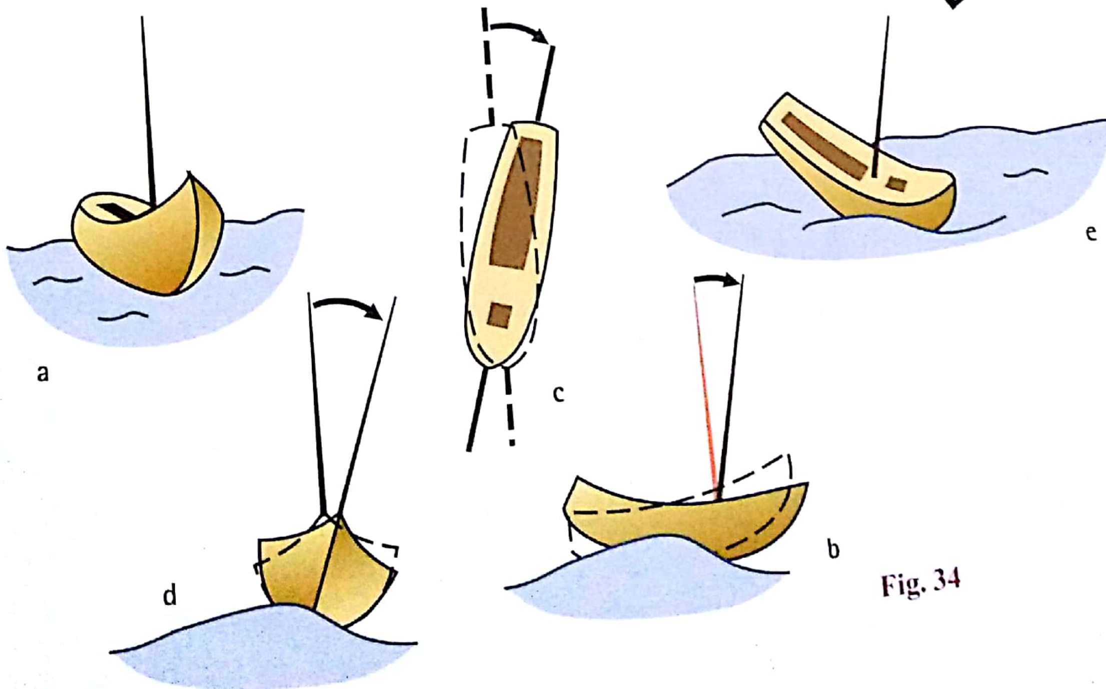


Fig. 34

Les mouvements dans des articulations subtalaire et transverse du tarse

Les **déplacements relatifs des os du tarse postérieur** sont faciles à analyser sur une préparation anatomique dont on prend des radiographies en position d'inversion et d'éversion. Si l'on a eu soin de transfixer chacun des os avec une broche métallique **a** : pour le talus **(bleu)**, **b** : pour le calcanéus **(rouge)**, **c** : pour le scaphoïde **(vert)**, **d** : pour le cuboïde **(orange)**, on peut aussi apprécier les déplacements angulaires.

Sur une radio en **incidence verticale** (vue supérieure), le talus restant fixe, le **passage de l'éversion (Fig. 35) à l'inversion (Fig. 36)** se traduit par les déplacements suivants :

- le **scaphoïde c** glisse en dedans sur la tête talaire et tourne de 5°;
- le **cuboïde d** suit le mouvement, tourne du même angle et glisse en dedans par rapport au calcanéus et au scaphoïde ;
- le **calcanéus b** avance légèrement et tourne sous le talus de 5° aussi.

Ces trois rotations élémentaires s'effectuent *dans le même sens*, celui de l'**adduction**.

Une **incidence frontale** (vue antéro-postérieure), le talus étant toujours considéré comme fixe, montre les déplacements suivants lors du **passage de l'éversion (Fig. 37) à l'inversion (Fig. 38)** :

- le **scaphoïde c** tourne de 25° et déborde un peu plus le talus en dedans ;
- le **cuboïde d** disparaît complètement derrière l'ombre du calcanéus et tourne de 18°;
- le **calcanéum b** glisse en dedans sous le talus et tourne de 20°.

Ces trois rotations élémentaires s'effectuent dans le même sens, celui de la **supination** et le scaphoïde tourne plus que le calcanéus et surtout que le cuboïde.

Enfin, sur une **incidence latérale** (vue de profil), **entre l'éversion (Fig. 39) et l'inversion (Fig. 40)**, on reconnaît les déplacements suivants :

- le **scaphoïde c** glisse littéralement *sous la tête du talus* et tourne sur lui-même de 45°, de telle sorte que sa face antérieure a tendance à regarder vers le bas ;
- le **cuboïde d** glisse aussi vers le bas, à la fois par rapport au calcanéus et au talus. Cette descente par rapport au talus est nettement plus importante que celle du scaphoïde sur le talus. Simultanément, le cuboïde tourne de 12°;
- le **calcanéus b** enfin, avance par rapport au talus, dont le bord postérieur surplombe nettement la surface rétrothalamique. En même temps, il tourne de 10° dans le sens de l'extension, comme le scaphoïde.

Ces trois mouvements élémentaires s'effectuent dans le même sens, celui de l'**extension**.

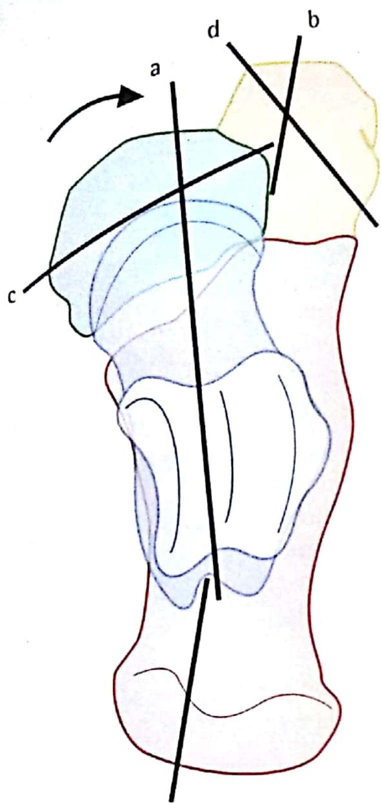


Fig. 35

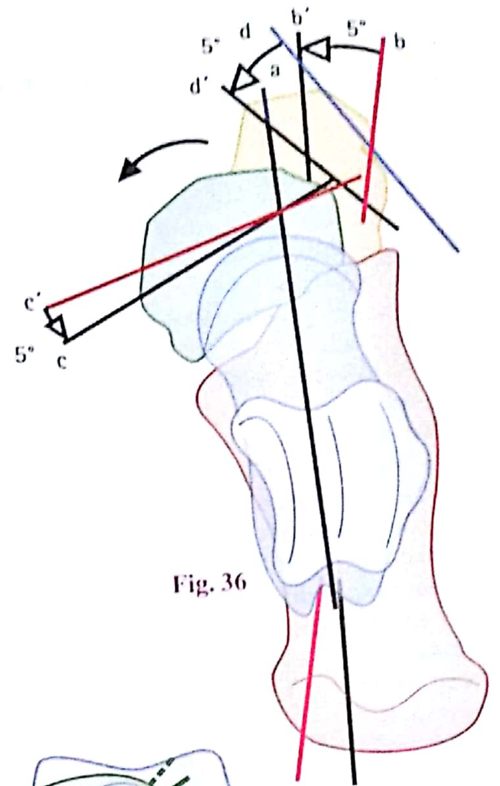


Fig. 36

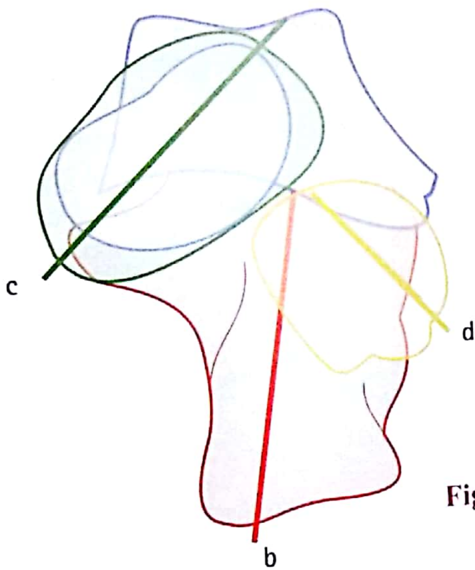


Fig. 37

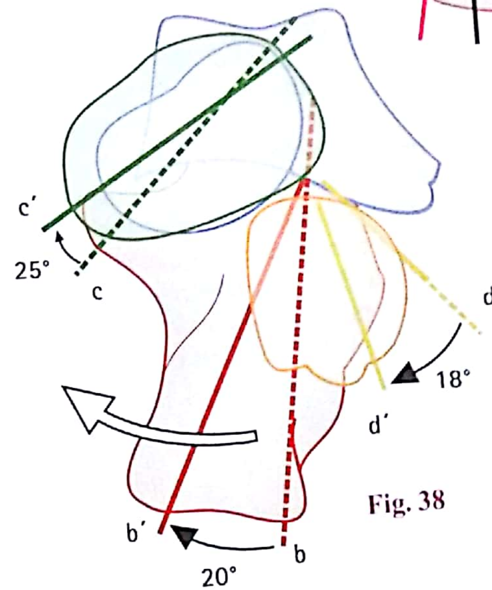


Fig. 38

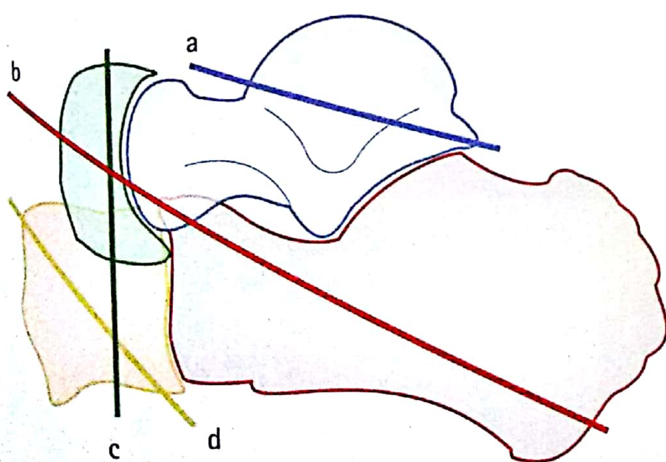


Fig. 39

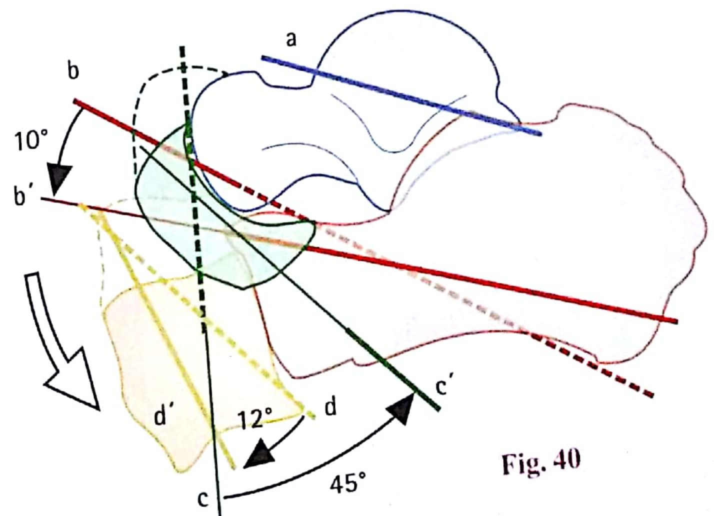


Fig. 40

Les mouvements dans l'articulation transverse du tarse

Les mouvements dans l'**articulation transverse du tarse** sont conditionnés par la forme des surfaces articulaires et la disposition des ligaments.

Globalement (**Fig. 41 : talus et calcanéus vus de face**), les surfaces articulaires sont disposées suivant un axe **xx'** oblique de haut en bas et de dedans en dehors, incliné à **45°** sur l'horizontale et qui sert grosso modo de **charnière,** permettant des **déplacements** du couple scaphoïde-cuboïde en bas et en dedans (**flèches S et C**) ou en haut et en dehors. La surface de la tête talaire, ovalaire à grand axe **yy'** incliné à 45° sur l'horizontale (angle « de rotation » du col du talus) est allongé dans le sens de ce mouvement.

Les **déplacements du scaphoïde sur la tête du talus** s'effectuent en effet vers le dedans (**Fig. 42**) et vers le bas (**Fig. 43**) sous la traction du muscle tibial postérieur **TP** dont le tendon se fixe sur le tubercule du scaphoïde. La tension du ligament talo-scaphoïdien dorsal **a** limite ce mouvement. Le changement d'orientation du scaphoïde entraîne, par l'intermédiaire des cunéiformes et des trois premiers métatarsiens, **l'adduction et le creusement de l'arche interne** de la voûte plantaire (voir p. 228).

Simultanément, lors du déplacement du scaphoïde par rapport au calcanéus dans la **position d'éversion** (**Fig. 44 : vue supérieure, le talus étant enlevé**), le ligament glénoïdien **b**, le bord inférieur du ligament deltoïde **c** et le faisceau interne du ligament bifurqué **d** sont tendus. La contraction du tibial postérieur, lors du **mouvement d'inversion** (**Fig. 45**), rapproche le scaphoïde du calcanéus (**flèche bleue**) et fait remonter le talus sur le thalamus (**flèche rouge**), ce qui détend les ligaments précités.

On comprend maintenant pourquoi les surfaces antérieures du calcanéus ne se prolongent pas jusqu'au scaphoïde ; une surface articulaire, supportée par une console osseuse, donc rigide, ne permettrait pas ces déplacements relatifs du scaphoïde par rapport au calcanéus. Par contre, la surface souple du ligament glénoïdien **b** est indispensable, comme nous le verrons (p. 230), à l'élasticité de l'arche interne de la voûte plantaire. Il permet son creusement.

Les **mouvements du cuboïde sur le calcanéus** sont très limités vers le haut (**Fig. 46 : vue interne**) par deux facteurs :

- la **saillie du grand processus** (**flèche noire**) du calcanéus, véritable rostre qui forme butée à la partie supérieure de l'interligne ;
- la **tension du puissant ligament calcanéo-cuboïdien plantaire f**, qui limite rapidement le bâillement inférieur a de l'interligne.

Par contre, vers le bas (**Fig. 47**), le cuboïde glisse facilement sur la convexité de la facette calcanéenne. Ce mouvement est arrêté par la **tension du faisceau externe e du ligament bifurqué**.

Dans le **sens transversal** (**Fig. 48 : coupe horizontale suivant le niveau AB de la figure 41**), le glissement du cuboïde est *plus facile vers le dedans*, seulement limité par la tension du ligament calcanéo-cuboïdien dorsal **g**. Au total, le déplacement du cuboïde s'effectue *de façon préférentielle vers le bas et le dedans.*

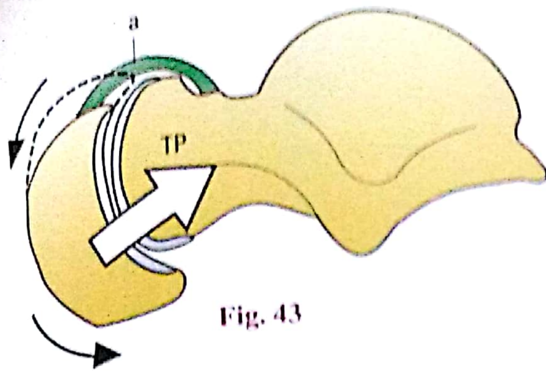


Fig. 43

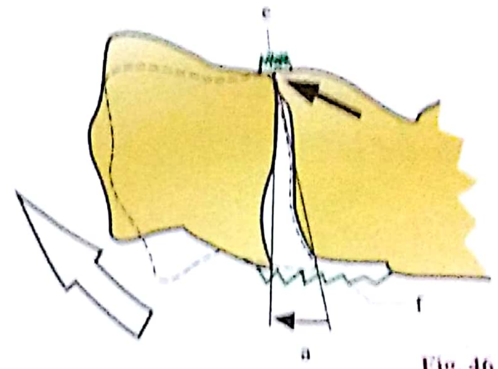


Fig. 46

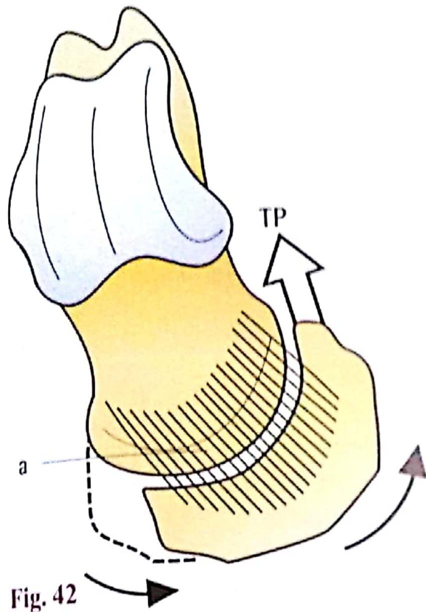


Fig. 42

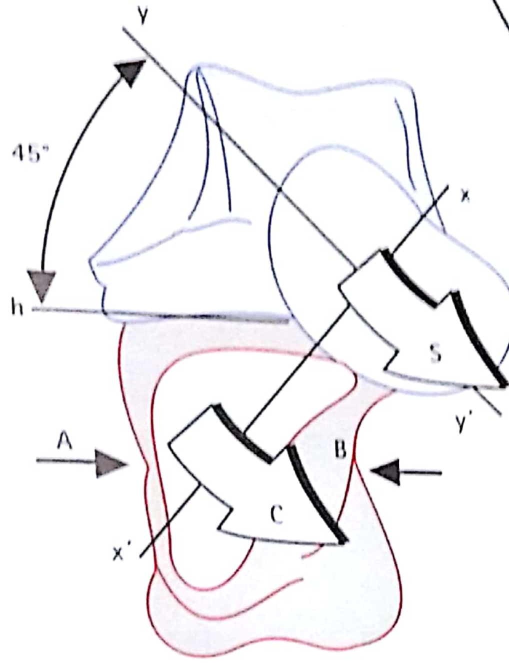


Fig. 41

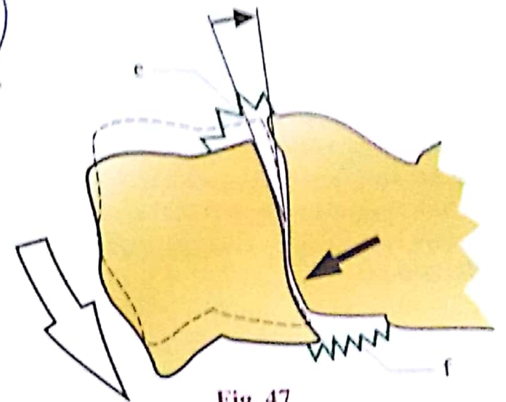


Fig. 47

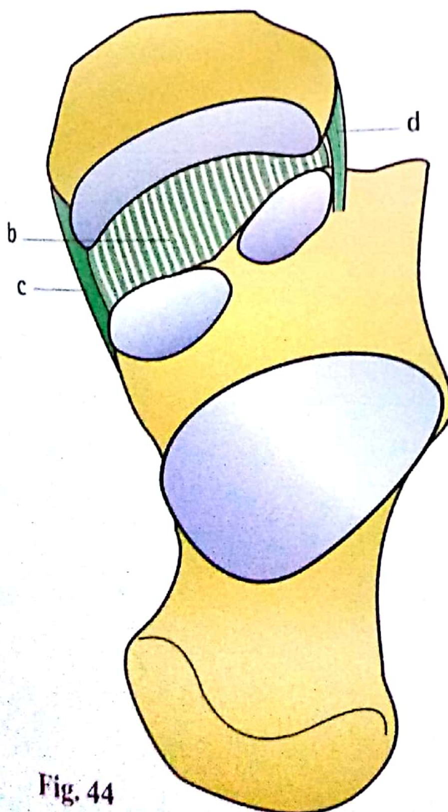


Fig. 44

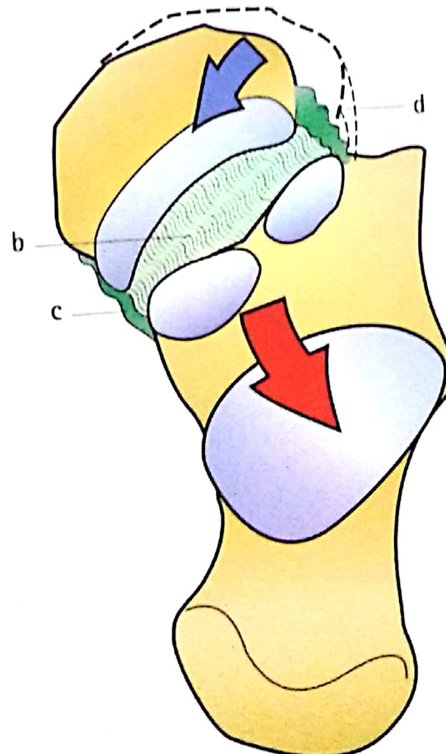


Fig. 45

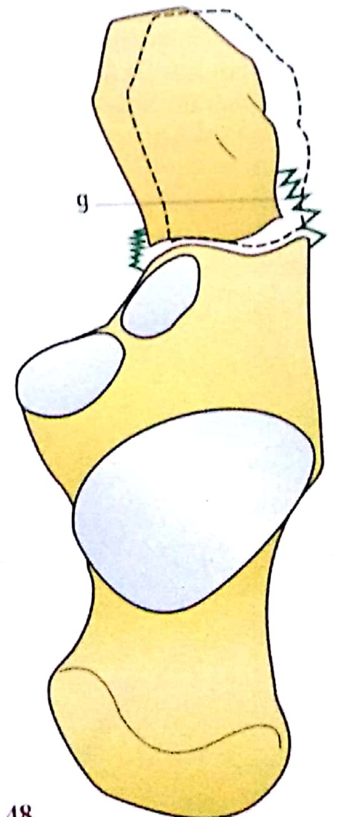


Fig. 48

Fonctionnement global des articulations du tarse postérieur

À regarder et à manipuler une préparation anatomique du tarse postérieur, une évidence s'impose : toutes ces articulations forment un ensemble fonctionnel indissociable, le **complexe articulaire de l'arrière-pied**, dont le rôle est d'adapter l'orientation et la forme de la voûte plantaire tout entière.

Les articulations subtalaire et transverse du tarse sont mécaniquement liées et réalisent ensemble l'**équivalent d'une seule articulation à un degré de liberté** autour de l'**axe de Henke mn** (voir aussi le modèle du pied en fin de volume).

Les schémas de cette page montrent les quatre os du tarse postérieur de deux points de vue différents : en **vues antéro-externes (Fig. 49 et 51)** et en **vues antérieures (Fig. 50 et 52)**. Pour chacun de ces points de vue, on a juxtaposé dans le sens horizontal les positions correspondant à l'**inversion (Fig. 49 et 50)** et les positions correspondant à l'**éversion (Fig. 51 et 52)**. Il est ainsi possible d'apprécier les *changements d'orientation du couple scaphoïde-cuboïde* par rapport au talus qui reste fixe, par définition.

Mouvement d'inversion (Fig. 49 et 50)

- Le tibial postérieur tire le scaphoïde **sca** qui découvre la partie supéro-externe de la tête du talus **d**.
- Le scaphoïde entraîne le cuboïde **cub** par l'intermédiaire des ligaments scapho-cuboïdiens.
- le cuboïde entraîne à son tour le calcanéus **calc**, qui plonge en avant sous le talus **tal**.
- Le sinus du tarse s'ouvre au maximum **(Fig. 49)**, tandis que se tendent les deux faisceaux du ligament interosseux **1** et **2**.
- Le thalamus **a'** est découvert dans sa portion antéro-inférieure, tandis que l'interligne talo-calcanéen bâille en haut et en arrière.

En résumé

- Le couple scaphoïde-cuboïde **(Fig. 50)** est attiré en dedans **(flèche rouge Add)**, ce qui dirige l'avant-pied en avant et en dedans **(flèche rouge, Fig. 49)**.
- En même temps, il tourne autour d'un axe antéro-postérieur passant par le ligament bifurqué qui travaille ainsi en élongation-torsion. Cette rotation, conséquence de l'élévation du scaphoïde et de l'abaissement du cuboïde, réalise une supination **(flèche rouge)** : la plante du pied s'oriente en dedans par **abaissement de l'arche externe** – la facette cuboïdienne correspondant au cinquième métatarsien **Vm** regarde en bas et en avant – et par **élévation de l'arche interne** – la facette pour le premier cunéiforme **Ic** sur le scaphoïde s'oriente directement vers l'avant.

Mouvement d'éversion (Fig. 51 et 52)

- Le court fibulaire, inséré sur le styloïde du cinquième métatarsien, tire le cuboïde en dehors et en arrière.
- Le cuboïde entraîne le scaphoïde qui découvre la partie supéro-interne de la tête du talus **d**.
- Ainsi que le calcanéus qui plonge en arrière sous le talus.
- Le sinus du tarse se ferme **(Fig. 51)** et le mouvement est arrêté par la butée du talus sur le plancher du sinus du tarse.
- La partie postéro-supérieure du thalamus est découverte.

En résumé

- Le couple scaphoïde-cuboïde **(Fig. 52)** est attiré en dehors **(flèche bleue Abd)**, ce qui dirige l'avant-pied en avant et en dehors **(flèche bleue, fig. 51)**.
- En même temps, il tourne sur lui-même dans le sens de la **pronation (flèche bleue)** par abaissement du scaphoïde et abduction du cuboïde dont la facette **Vm** s'oriente vers l'avant et le dehors.

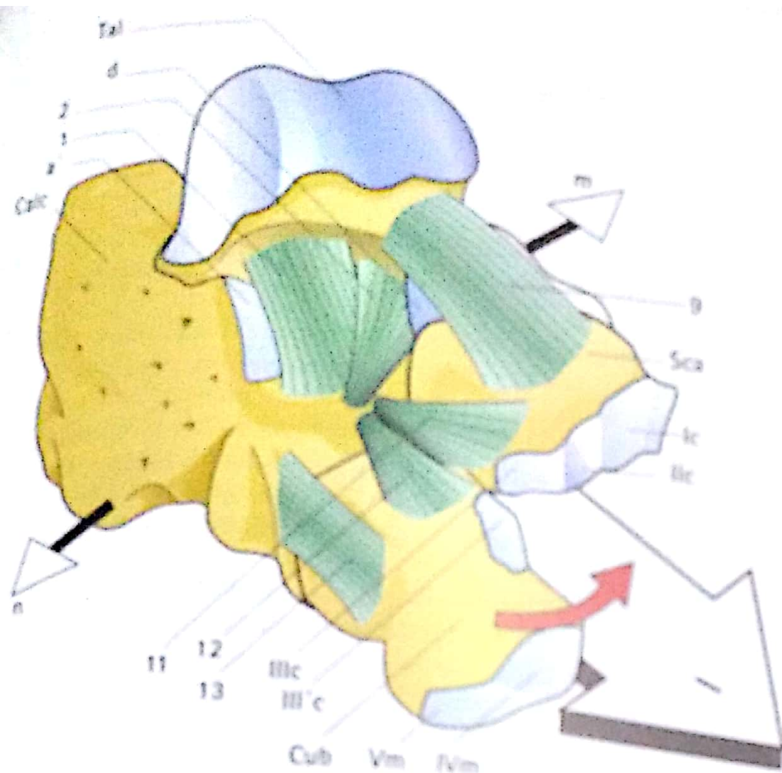


Fig. 49

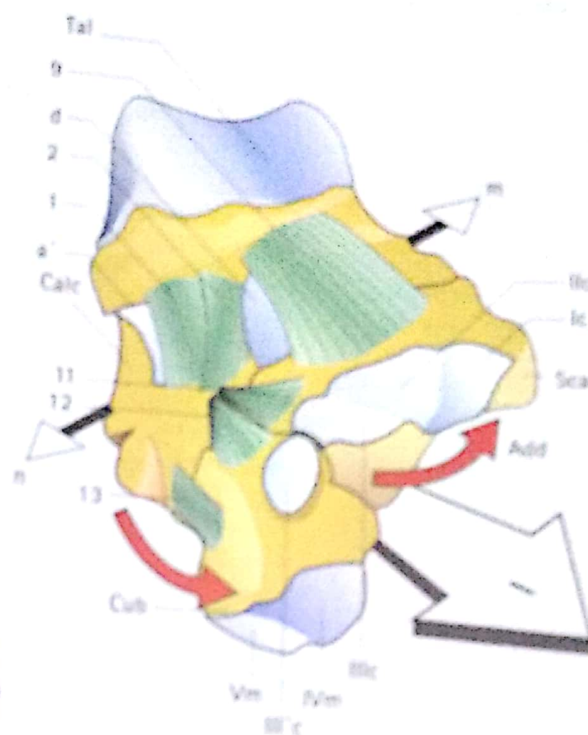


Fig. 50

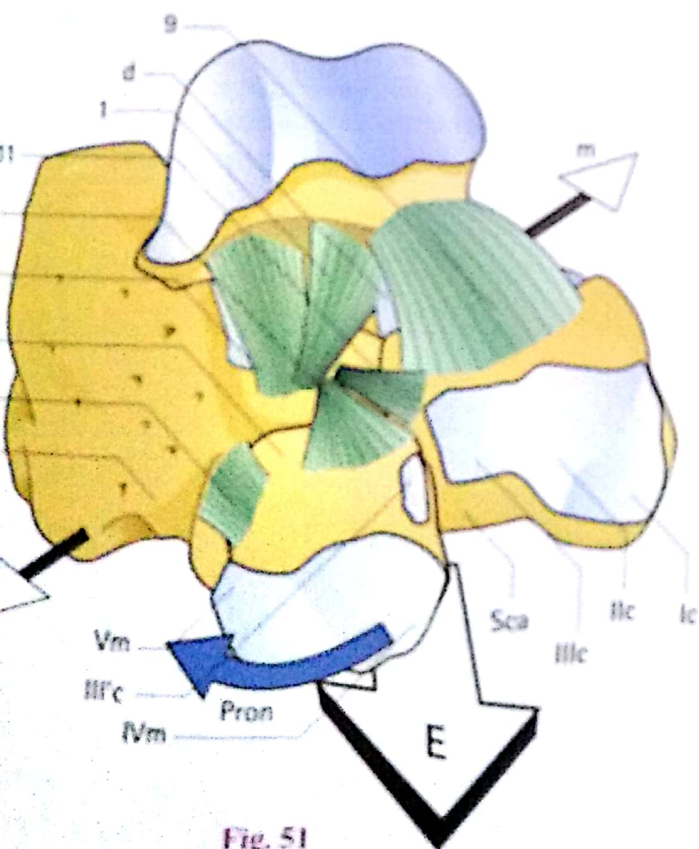


Fig. 51

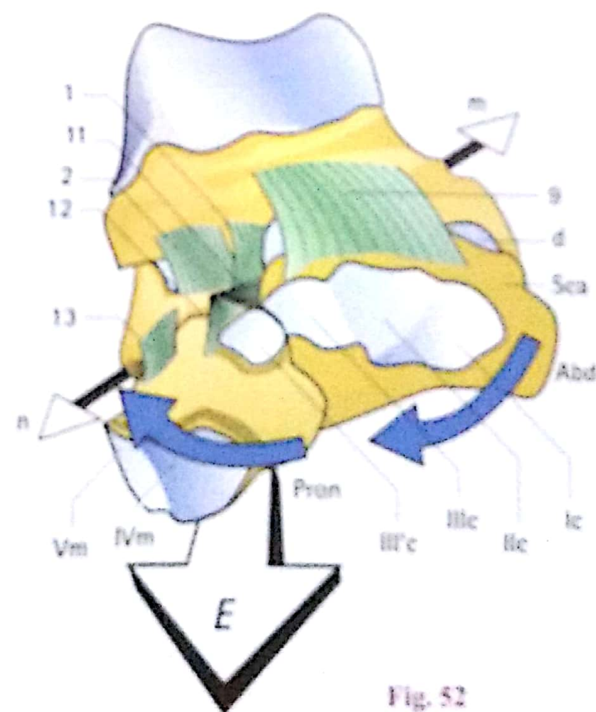


Fig. 52

Le cardan hétérocinétique de l'arrière-pied

Cet **axe de Henke** que nous venons de définir n'est pas, comme on pourrait l'imaginer, un axe fixe et immuable. En réalité, c'est un **axe évolutif**, ce qui signifie qu'il se déplace au cours même du mouvement. Ceci peut se déduire de l'examen de radiographies successives du tarse postérieur, prises au cours du mouvement d'inversion-éversion : lorsqu'on construit les centres instantanés de rotation sur les couples de radios, ils ne coïncident pas entre eux. On peut donc évoquer l'hypothèse d'un axe de Henke évolutif **(Fig. 53)** entre une **position de départ 1** et une **position d'arrivée 2** et décrivant entre ces deux positions extrêmes un plan gauche qui contient ses positions intermédiaires. Il reste à en faire la démonstration mathématique grâce à l'ordinateur.

Au niveau de l'arrière-pied, il existe donc **deux axes successifs**, non parallèles, l'**axe de l'articulation talo-crurale**, et l'**axe de Henke**, représentant, comme nous venons de la voir, l'axe global de l'articulation subtalaire et de l'articulation transverse du tarse. Il est donc possible de prendre le cardan comme modèle mécanique du complexe articulaire de l'arrière-pied.

En **mécanique industrielle**, le cardan **(Fig. 54)** se définit comme une articulation à deux axes perpendiculaires entre eux, comprise entre deux arbres de rotation. De telles articulations transmettent le mouvement de rotation d'un arbre à l'autre, quel que soit l'angle formé entre eux ; il en existe sur les automobiles à traction avant entre l'arbre moteur de chacune des roues avant, qui sont aussi directrices, et leur axe. On les appelle « joint homocinétique », car le couple moteur reste égal à lui-même quelles que soient les positions relatives.

En **biomécanique**, on connaît trois articulations de ce type :

- la **sterno-costo-claviculaire**, articulation « en selle » ;
- la **radio-carpienne**, qui est un complexe articulaire de type condylaire ;
- la **trapézo-métacarpienne**, deuxième articulation en selle, dont le fonctionnement a été particulièrement étudié (voir Volume 1).

En ce qui concerne l'arrière-pied, la différence importante réside dans le fait qu'il s'agit d'un cardan « hétérocinétique ». Cela signifie que le cardan n'est pas régulier : au lieu d'être perpendiculaires entre eux dans l'espace – on dit « orthogonaux » – ses **axes sont obliques l'un par rapport à l'autre**. Pour matérialiser ce fait, on a superposé sur un schéma de cheville le modèle mécanique de ce cardan hétérocinétique **(Fig. 55)**, où l'on reconnaît :

- le **squelette jambier A** et **celui de l'avant-pied B** ;
- l'**axe de l'articulation talocrurale XX'**, transversal, mais légèrement oblique en avant et en dedans ;
- l'**axe de Henke YY'**, oblique d'arrière en avant, de bas en haut et de dehors en dedans ;
- une **pièce intermédiaire C**, qui n'a pas d'équivalent osseux, tétraèdre déformé dont deux arêtes opposées sont occupées par les deux axes du cardan.

La non-orthogonalité de ces axes crée des directions préférentielles dans les mouvements du complexe articulaire de l'arrière-pied. Les muscles, qui s'organisent par rapport à ces deux axes (voir p. 220), ne peuvent produire que deux types de mouvements, les autres étant mécaniquement interdits :

- l'**inversion (Fig. 56)**, qui porte le pied en extension et oriente la plante en dedans ;
- l'**éversion (Fig. 57)**, qui fléchit le pied sur la jambe et fait regarder sa plante en dehors.

La compréhension du mécanisme de ce cardan hétérocinétique est fondamentale pour saisir les actions musculaires, l'orientation de la plante du pied, sa statique et sa dynamique.

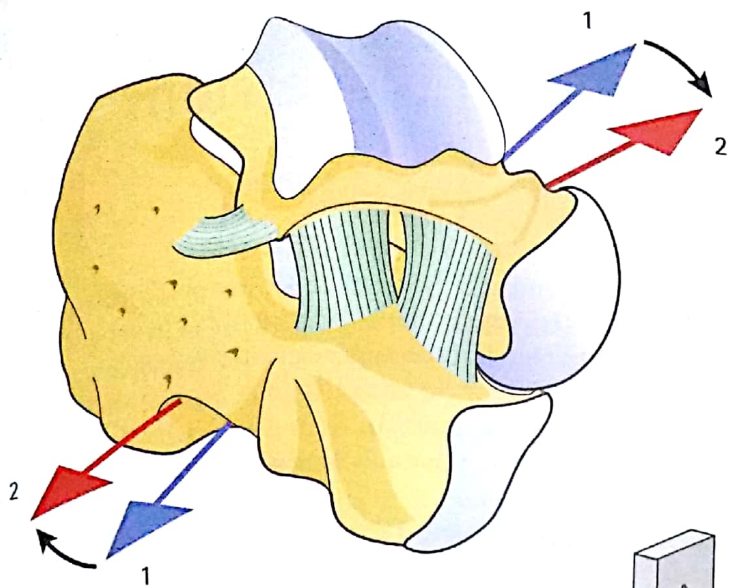
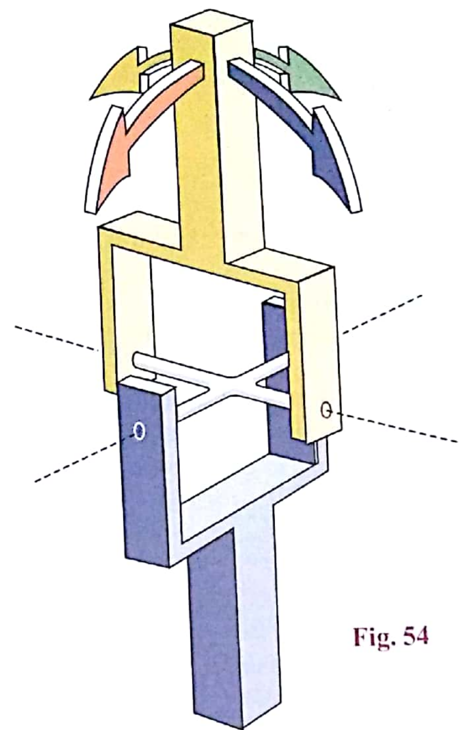


Fig. 53


Fig. 54

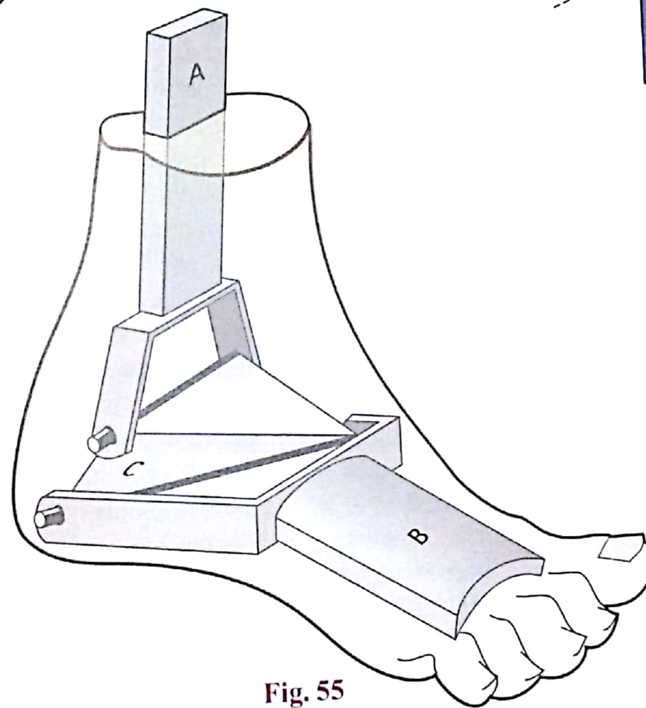


Fig. 55

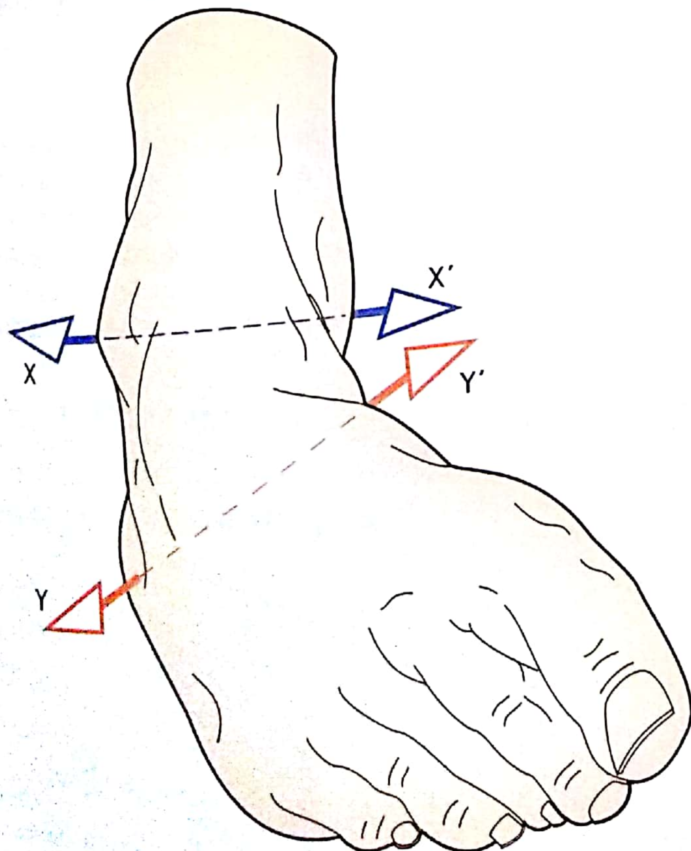


Fig. 56

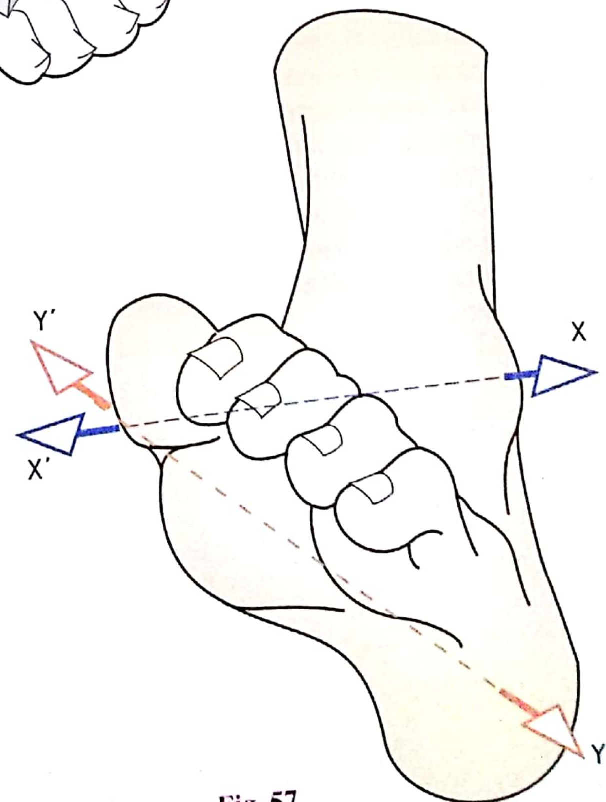


Fig. 57

Les chaînes ligamentaires d'inversion et d'éversion

Les mouvements d'inversion et d'éversion du pied sont limités par deux ordres de résistances :

- les butées osseuses ;
- les chaînes ligamentaires de l'arrière-pied.

Limitation du mouvement d'inversion

Nous avons vu précédemment que lors de l'inversion, la plongée du calcanéus en bas et en dedans fait remonter le talus vers la partie supérieure de la surface thalamique où il ne rencontre aucune butée osseuse, tandis que la partie antéro-inférieure du thalamus est découverte. Simultanément, la tête du talus est découverte par le scaphoïde qui glisse en bas et en dedans sans être arrêté par une butée osseuse.

Aucune butée osseuse ne limite donc le mouvement d'inversion, sauf la malléole médiale qui maintient en dedans la trochlée du talus.

La **chaîne ligamentaire d'inversion** est donc le seul facteur de limitation de ce mouvement au cours duquel on voit se tendre **(Fig. 58)**, suivant deux lignes de tension :

- la **ligne de tension principale** qui part de la malléole latérale, puis suit le faisceau antérieur du ligament collatéral latéral **1** de l'articulation talocrurale, se dédouble vers le calcanéus et le cuboïde en passant par le ligament interosseux **2** et **3**, le ***faisceau*** calcanéo-cuboïdien du ligament bifurqué **7** (branche externe), le ligament calcanéo-cuboïdien supéro-externe **6** ou dorsal, le **ligament calcanéo-cuboïdien plantaire** (non figuré ici), le faisceau scaphoïdien du ligament bifurqué **8** ; à partir du talus, la tension se transmet au scaphoïde par le ligament talo-scaphoïdien dorsal **5** ;
- la **ligne de tension accessoire** part de la malléole médiale, suit le faisceau postérieur du ligament collatéral médial de l'articulation talo-crurale (non visible ici), puis le ligament talo-calcanéen postérieur (non visible).

En tant que relais ligamentaire, le talus constitue, lors de l'inversion, **deux points d'arrivée et trois points de départ ligamentaires**.

Limitation du mouvement d'éversion

Lors du mouvement d'éversion, la surface postérieure principale de la face inférieure du talus descend sur la pente du thalamus et vient buter sur la face supérieure du calcanéus, au niveau du plancher du sinus du tarse ; la joue externe du talus, sollicitée vers le dehors, bute sur la malléole latérale, et la rompt si le déplacement se poursuit. **Les butées osseuses sont donc prépondérantes.**

La **chaîne ligamentaire d'éversion** comporte elle aussi deux lignes :

- la **ligne de tension principale** part de la malléole médiale, empruntant les deux plans du faisceau antérieur du ligament collatéral médial de l'articulation talo-crurale :

– le plan superficiel, le ligament deltoïde **9**, la solidarise directement avec le scaphoïde et le calcanéus, eux-mêmes reliés entre eux par le ligament glénoïdien **11**,

– le plan profond **10** la relie au talus par le faisceau tibio-talaire antérieur (non figuré), puis au calcanéus par le ligament interosseux **12**,

– à son tour, le calcanéus et relié au cuboïde et au scaphoïde par le ligament bifurqué, dédoublé en deux faisceaux, le cuboïdien **7** et le scaphoïdien **8** ; on voit que ce ligament assure la cohésion entre les trois os aussi bien lors de l'inversion que de l'éversion,

– la liaison plantaire est assurée par le grand ligament calcanéo-cuboïdien plantaire (non visible sur cette figure) ;

- la **ligne de tension accessoire** prend son origine sur la malléole latérale :

– d'une part, par le faisceau postérieur du ligament collatéral latéral de l'articulation talo-crurale (non figuré) vers le talus et, de là, vers le calcanéus par le ligament talo-calcanéen externe **13**,

– d'autre part, par le faisceau moyen du ligament collatéral latéral de l'articulation talo-crurale **4** directement vers le calcanéus.

Au total, le relais talaire reçoit **deux arrivées** et sert d'origine à **deux départs ligamentaires**.

Globalement, on peut en tirer la notion que l'**inversion rompt les ligaments,** créant des entorses graves, en particulier le faisceau antérieur du ligament collatéral latéral de l'articulation talo-crurale, tandis que l'**éversion fracture les malléoles, en premier lieu la malléole latérale**.



Fig. 59

3
5
8
1
2
4
7
6

Fig. 58

Les articulations scapho-cunéennes, intercunéennes et tarso-métatarsiennes

Toutes ces articulations sont des **arthrodies** effectuant des mouvements de glissement et de bâillement de faible amplitude.
Sur le couple scaphoïde-cuboïde **(Fig. 60 : vue de face)**, on distingue les **trois facettes Ic, IIc, IIIc** articulant le scaphoïde **Sca** avec le premier, le deuxième et le troisième cunéiforme, et les **trois facettes** articulant le cuboïde **Cub** avec le cinquième métatarsien **Vm**, le quatrième métatarsien **IVm** et le troisième cunéiforme **III'c**. Le cuboïde supporte en outre l'extrémité externe du scaphoïde par l'articulation scapho-cuboïdienne **(flèches)**.
Une **vue antéro-externe (Fig. 61 : vue en éclaté)** montre comment le bloc des trois cunéiformes **C1, C2** et **C3** artificiellement soulevé vient s'articuler avec le couple scaphoïde-cuboïde : la double flèche indique comment le troisième cunéiforme repose sur le cuboïde, sur une facette **III'c** située juste en avant de la facette d'articulation avec le scaphoïde formant l'articulation cunéo-cuboïdienne.
Les articulations intercunéennes **(Fig. 62 : vue supérieure des articulations scapho-cunéennes, intercunéennes et partiellement tarso-métatarsienne)** comportent chacune des facettes et des ligaments interosseux : entre le premier et le deuxième cunéiforme, le ligament interosseux **19** a été sectionné ; entre le deuxième et le troisième cunéiforme, ce ligament interosseux **20** a été laissé intact.
L'**articulation tarso-métatarsienne** met en présence **(Fig. 64 : vue supérieure)** d'une part les trois cunéiformes **C1, C2, C3** en dedans et le cuboïde **Cub** en dehors, d'autre part la base des cinq métatarsiens **M1, M2, M3, M4, M5**. Elle est constituée d'une *succession d'arthrodies très étroitement imbriquées*. Sur une vue dorsale de l'articulation ouverte **(Fig. 63, d'après Rouvière)**, on distingue les différentes facettes du tarse et les facettes correspondantes de la base des métatarsiens.

La base du deuxième métatarsien **M2**, avec ses trois facettes, vient s'encastrer dans la mortaise des trois cunéiformes constituée par : la facette interne **IImC3** du troisième cunéiforme **C3**, la facette antérieure **IImC2** du deuxième cunéiforme **C2** et la facette externe **IImC1** du premier cunéiforme **C1**. Elle est maintenue en outre par de **puissants ligaments**, bien visibles **(Fig. 62)** lorsqu'on a ouvert l'articulation par le dessus, fait tourner sur son axe le premier métatarsien **(flèche 1)** et écarté en dehors le troisième métatarsien **(flèche 2)**. On distingue alors :

- en dedans, le puissant **ligament bifurqué 18**, tendu de la face interne du premier cunéiforme à la face interne de la base du premier métatarsien. C'est *la clé de la désarticulation* ;
- en dehors, un **système ligamentaire** comportant des fibres directes **21** entre C2 et M2 et **22** entre C3 et M3 et des fibres croisées **23** entre C3 et M2 et **24** entre C2 et M3.

La **solidité de l'articulation tarso-métatarsienne** est en outre assurée par de nombreux ligaments **(Fig. 64 : vue dorsale** et **Fig. 65 : vue plantaire)** étendus de la base de chaque métatarsien vers l'os du tarse correspondant et vers la base des métatarsiens voisins. Il existe en particulier sur la face dorsale **(Fig. 64)** des ligaments rayonnant de la base du deuxième métatarsien vers tous les os voisins, et sur la face plantaire **(Fig. 65)** des ligaments étendus du premier cunéiforme aux trois premiers métatarsiens. Sur le côté plantaire de la base du premier métatarsien se fixe le tendon du long fibulaire **LF**, qui vient de parcourir sa gouttière plantaire **(flèche blanche 25)**. Sur le styloïde du cinquième métatarsien se fixe le tendon du court fibulaire **CF**. L'**interligne tarso-métatarsien** est figuré sur ces deux schémas par une ligne de tirets rouge.

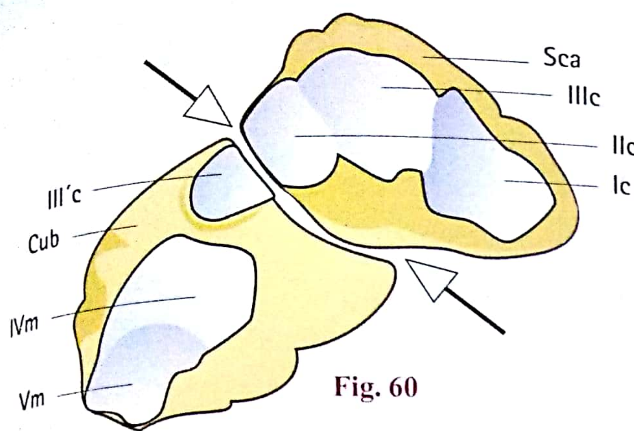


Fig. 60

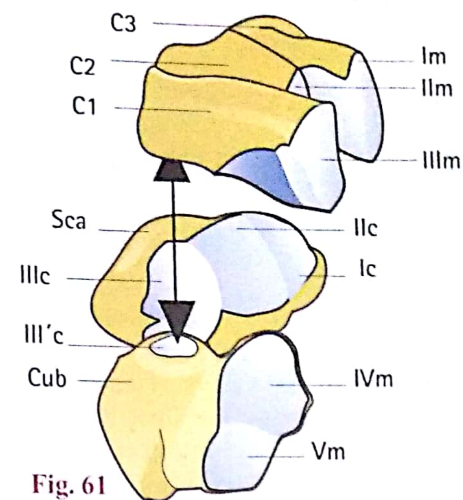


Fig. 61

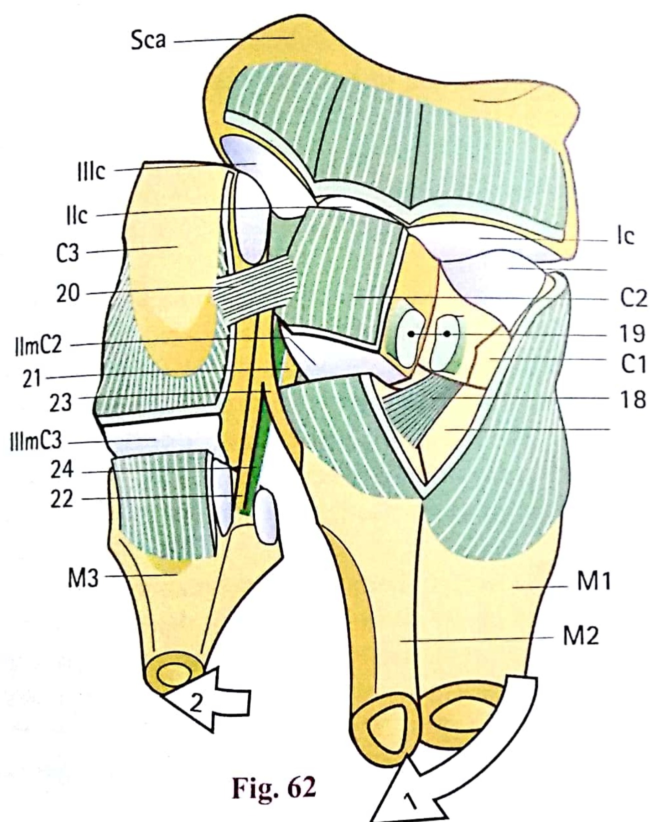


Fig. 62

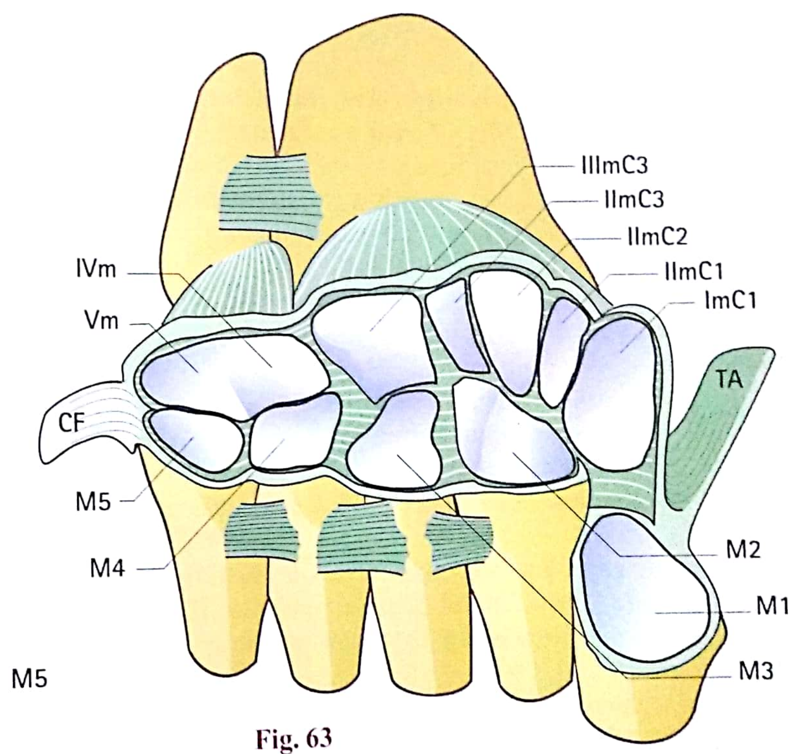


Fig. 63

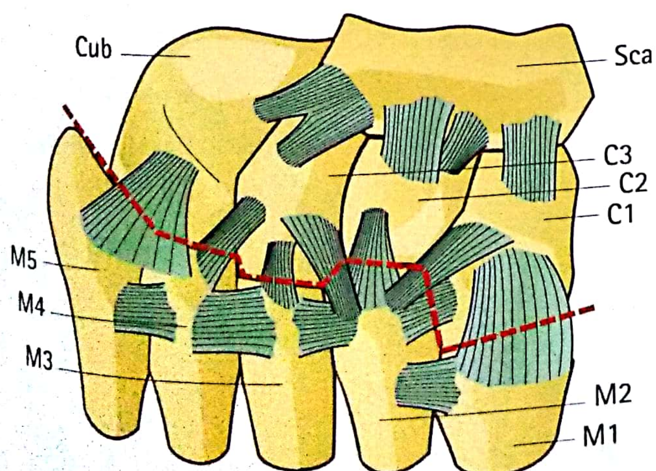


Fig. 64

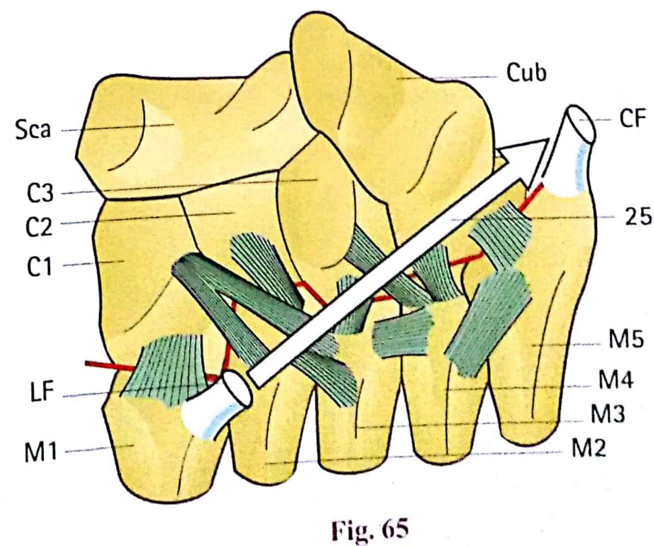


Fig. 65

Mouvements dans les articulations du tarse antérieur et dans la tarso-métatarsienne

Les **articulations intercunéennes (Fig. 66 : coupe frontale)** permettent de faibles mouvements verticaux qui modifient la courbure transversale de la voûte plantaire (voir p. 240). Le troisième cunéiforme **C3** repose sur le cuboïde **Cub** dont tout le tiers interne **(foncé)** sert de console à l'arche des cunéiformes.

Dans le **sens longitudinal (Fig. 67 : coupe sagittale)**, les légers déplacements des cunéiformes par rapport au scaphoïde **Sca** contribuent au *changement de courbure de l'arche interne* (voir p. 236).

Les **mouvements dans l'articulation tarso-métatarsienne** peuvent se déduire de la forme de l'interligne tarso-métatarsien et de l'orientation des surfaces articulaires, parfaitement décrites par l'anatomie classique **(Fig. 68 : vue supérieure)**.

- **Dans son ensemble**, l'interligne tarso-métatarsien est oblique de dedans en dehors, de haut en bas et d'avant en arrière : son extrémité interne est située à 2 cm en avant de l'externe. L'**obliquité générale** de cet axe de flexion-extension des métatarsiens concourt, comme l'obliquité de l'axe de Henke, aux **mouvements d'éversion-inversion** (voir modèle mécanique du pied).
- Le dépassement des cunéiformes suit une progression géométrique : le troisième cunéiforme **C3** déborde le cuboïde **Cub** de 2 mm ; le troisième cunéiforme déborde le deuxième **C2** de 4 mm ; le premier cunéiforme **C1** déborde le deuxième de 8 mm.

Ainsi se dessine entre les trois cunéiformes la **mortaise** dans laquelle s'encastre la base du deuxième métatarsien. Il est, par conséquent, le moins mobile de tous, et forme la **faîtière de la voûte plantaire** (voir p. 240).

- Les deux segments extrêmes de l'interligne possèdent une **obliquité opposée** : l'interligne **M1/C1**, oblique en avant et en dehors, tombe, lorsqu'il est prolongé, *au milieu du cinquième métatarsien* ; l'interligne **M5/Cub**, oblique en avant et en dedans, prolongé idéalement, aboutit près de la tête du premier métatarsien.

L'axe de flexion-extension des métatarsiens extrêmes, les plus mobiles, n'est donc pas perpendiculaire à l'axe longitudinal de ces métatarsiens, mais **oblique**. Il s'ensuit que ces **métatarsiens extrêmes ne se déplacent pas dans un plan sagittal**, mais sur une surface conique ; lorsqu'ils se fléchissent, **ils se déplacent en même temps latéralement vers l'axe du pied** (Fig. 70 : **vue schématique supéro-externe de l'interligne tarso-métatarsien avec les deux métatarsiens extrêmes)**.

- Le mouvement **aa'** de la tête du premier métatarsien comporte une composante de flexion **F** et une composante d'abduction **Abd** de 15° (d'après Fick).
- Symétriquement, le mouvement **bb'** de la tête du cinquième métatarsien se compose d'une flexion **F** associée à une adduction **Add**.

Ainsi, non seulement la tête de ces métatarsiens s'abaisse, mais encore elle se rapproche de l'axe du pied, ce qui entraîne **(Fig. 70)** un accroissement de courbure de l'arche antérieure, donc un **creusement de la partie antérieure de la voûte plantaire** suivant la courbe **a'b' (ligne tirets rouge)**. Inversement, l'extension des métatarsiens s'accompagne de l'aplatissement de l'arche antérieure (voir modèle mécanique du pied en fin de volume).

Le mouvement de rapprochement des métatarsiens extrêmes est encore favorisé **(Fig. 69 : vue antérieure des surfaces cuboïdiennes et cunéennes)** par l'obliquité des axes transversaux **xx'** et **yy'** de leurs surfaces articulaires : le mouvement suit la flèche épaisse à deux sens. Ces mouvements de creusement et d'aplatissement de l'arche antérieure sont schématisés sur une coupe schématique **(Fig. 71)**.

Les changements de courbure de l'arche antérieure sont donc la conséquence directe des mouvements dans l'interligne tarso-métatarsien.

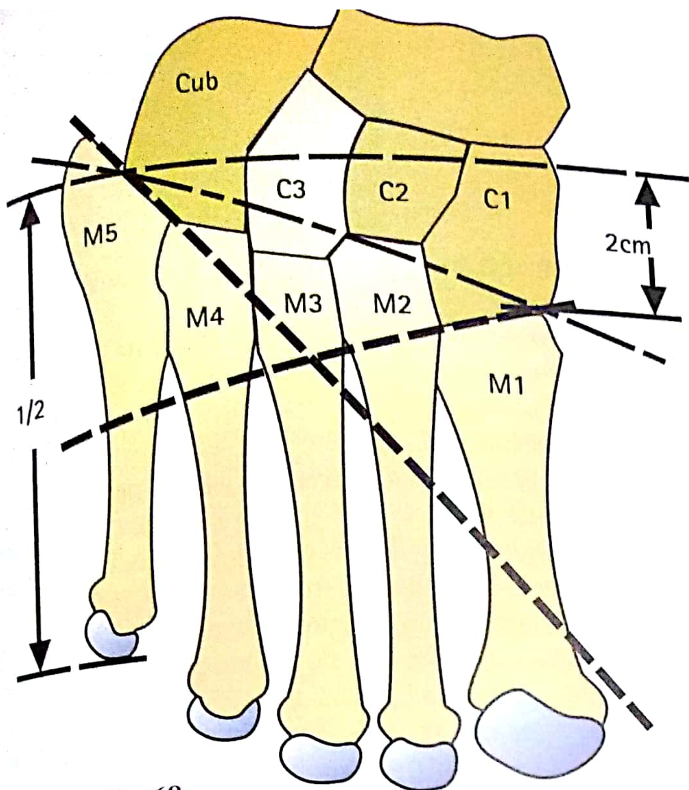


Fig. 68

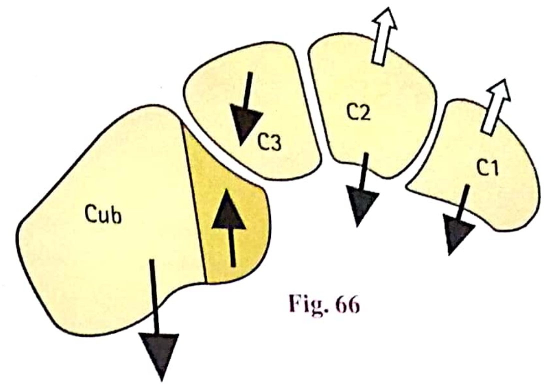


Fig. 66

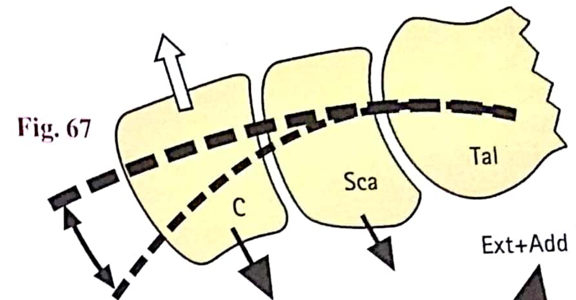


Fig. 67

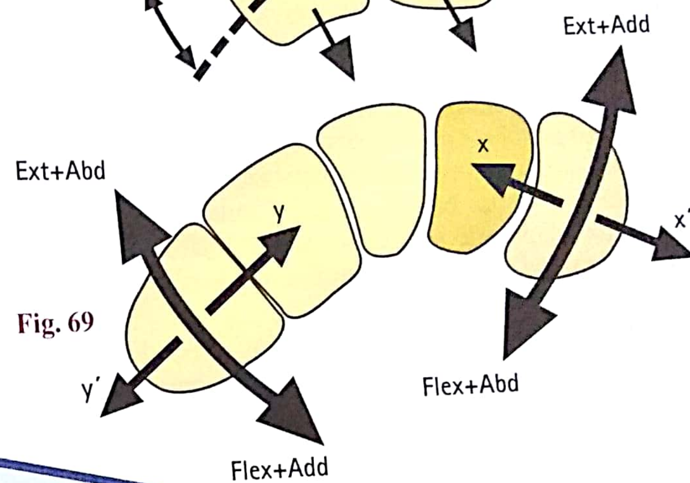


Fig. 69

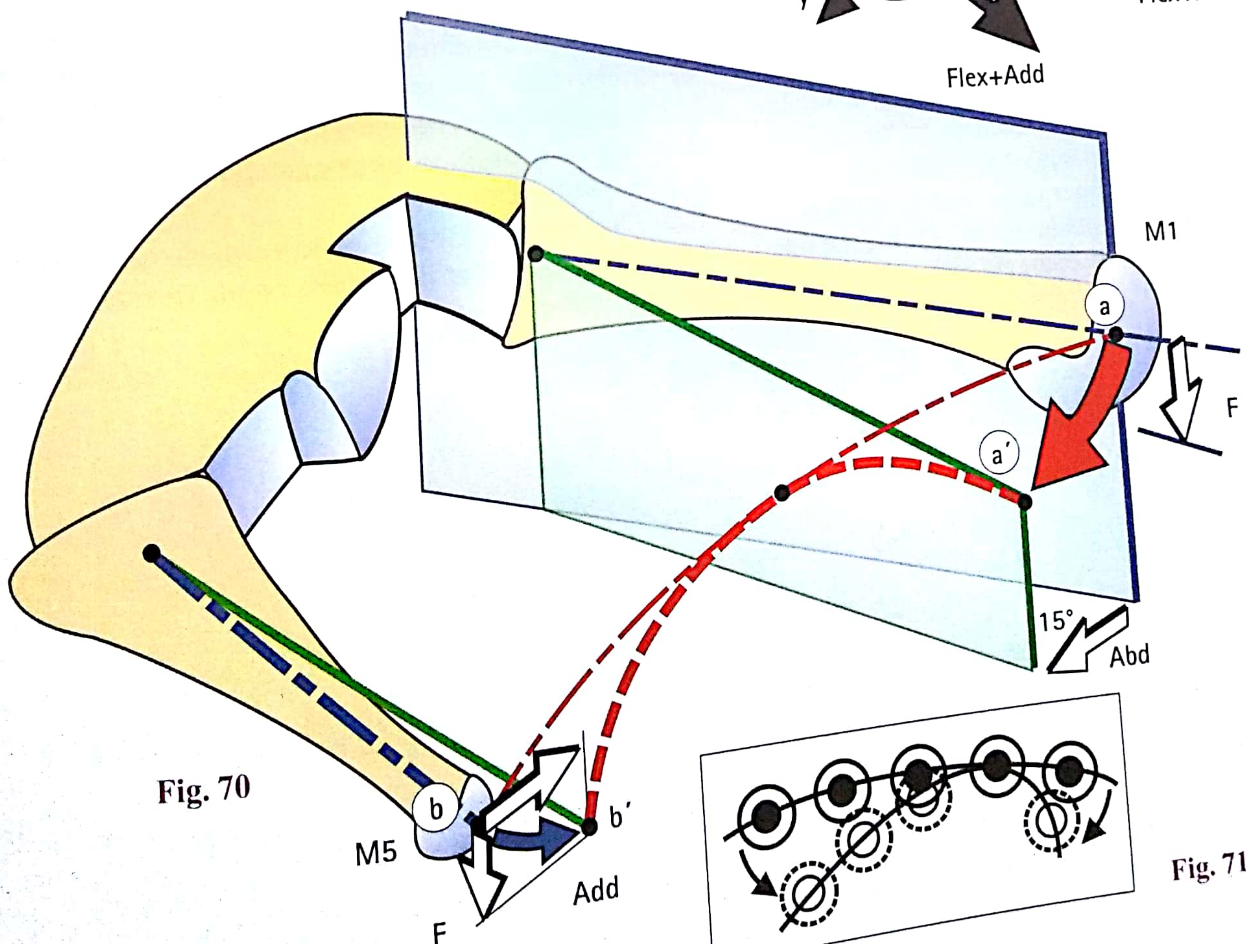
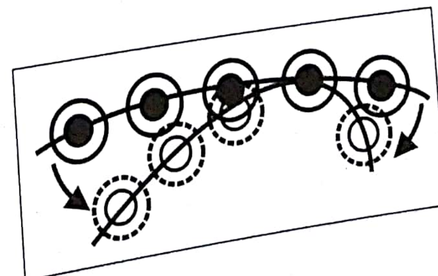


Fig. 70


Fig. 71

L'extension des orteils

Nous ne nous attacherons pas à décrire les articulations métatarso-phalangiennes et les articulations interphalangiennes des orteils, qui sont *semblables à celles des doigts* (voir Volume I). **Les seules différences sont d'ordre fonctionnel**, intéressant essentiellement les métatarso-phalangiennes. En effet, alors qu'au niveau des métacarpo-phalangiennes, la flexion dépasse l'extension, pour les métatarso-phalangiennes, l'extension dépasse la flexion :

- l'**extension active** est de 50-60° contre 30-40° pour la flexion active ;
- l'**extension passive (Fig. 72)**, indispensable lors du dernier temps du pas, atteint ou dépasse 90° contre 45-50° pour la flexion passive.

Les **mouvements de latéralité des orteils** dans les métatarso-phalangiennes sont beaucoup moins amples que ceux des doigts. En particulier, à la différence de celui du singe, l'hallux de l'homme a perdu ses possibilités d'opposition, ce qui traduit l'adaptation du pied humain à la marche bipède sur le sol.

L'**extension active des orteils** est due à trois muscles : deux muscles extrinsèques, le long extenseur de l'hallux et le long extenseur des orteils et un muscle intrinsèque, le court extenseur des orteils.

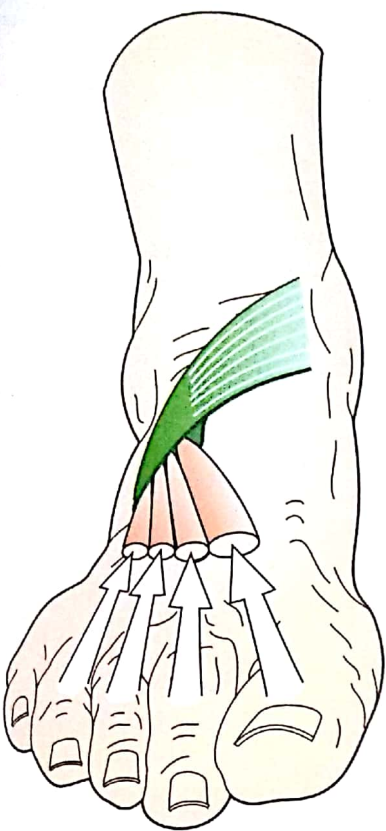
Le **muscle court extenseur des orteils (Fig. 73)** est tout entier contenu dans le dos du pied (d'où son ancien nom : le muscle pédieux). Les quatre corps charnus qui le composent prennent une insertion commune sur le plancher calcanéen du sinus du tarse, dans le dédoublement d'origine du ligament annulaire antérieur du cou-de-pied. Les quatre tendons grêles qui leur font suite vont se confondre avec le tendon extenseur des quatre premiers orteils, sauf pour le premier qui s'insère directement sur la face dorsale de la première phalange de l'hallux. Le cinquième orteil ne reçoit donc pas de court extenseur. Ce muscle est extenseur de la métatarso-phalangienne des quatre premiers orteils **(Fig. 74)**.

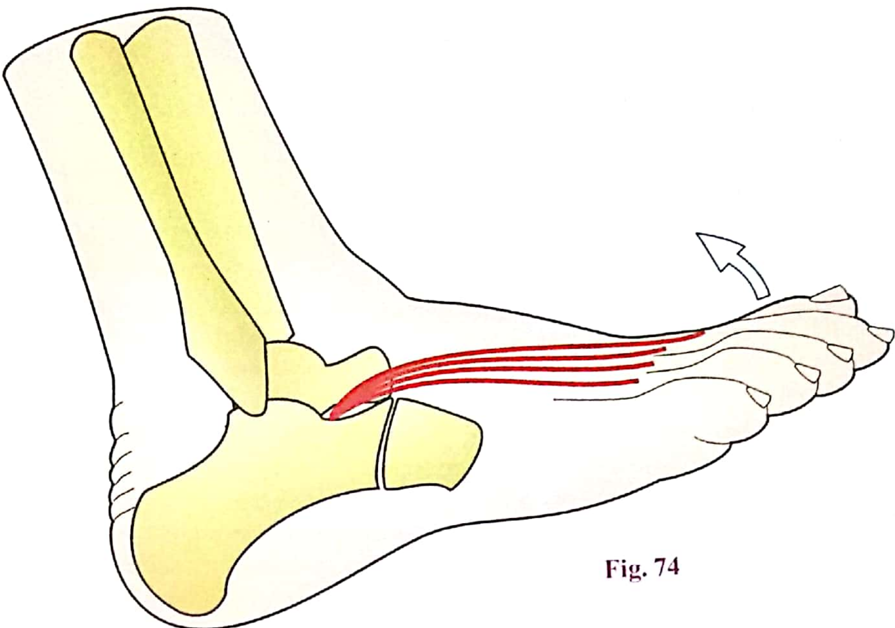
Le **long extenseur des orteils** et le **long extenseur de l'hallux** sont contenus dans la loge antérieure de la jambe ; leurs tendons se terminent sur les phalanges suivant des modalités qui seront étudiées plus loin (voir p. 214).

Le tendon du **long extenseur des orteils (Fig. 75)** passe à la face antérieure du cou-de-pied dans la fronde externe du ligament frondiforme, se subdivise en quatre tendons qui vont gagner les quatre derniers orteils après être passé sous la lame inférieure du ligament annulaire antérieur (voir aussi Fig. 98). Le cinquième orteil n'est donc étendu que par l'extenseur commun. Ce muscle est, comme son nom l'indique, extenseur des orteils, mais il est **aussi et surtout fléchisseur de la cheville** (voir p. 220). Pour que son action sur les orteils apparaisse à l'état pur, il faut lui associer la **contraction synergique-antagoniste** des extenseurs de la cheville, principalement le triceps, figuré ici par une flèche blanche.

Le tendon du **long extenseur de l'hallux (Fig. 76)** passe sous la lame supérieure du ligament annulaire antérieur, dans la fronde interne du ligament frondiforme, puis sous la lame inférieure (voir aussi Fig. 98) pour se terminer sur les deux phalanges du gros orteil : sur les bords latéraux de la première et sur la face dorsale de la base de la deuxième. Il est donc **extenseur de l'hallux**, mais **encore et surtout fléchisseur de la cheville**. Comme pour le **long extenseur des orteils**, la contraction synergique-antagoniste des extenseurs de la cheville est nécessaire pour que son action sur le gros orteil apparaisse isolément.

Pour Duchenne de Boulogne, le véritable extenseur des orteils est le court extenseur des orteils ; nous verrons plus loin ce qui justifie cette opinion.


Fig. 73


Fig. 74

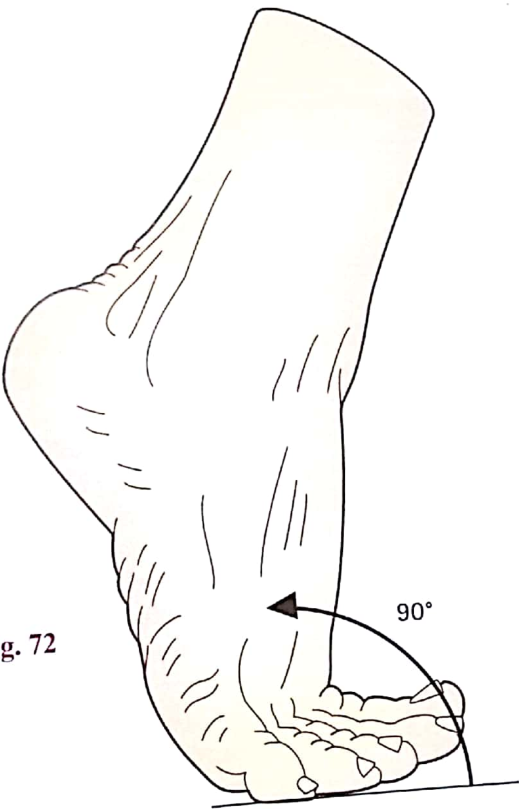
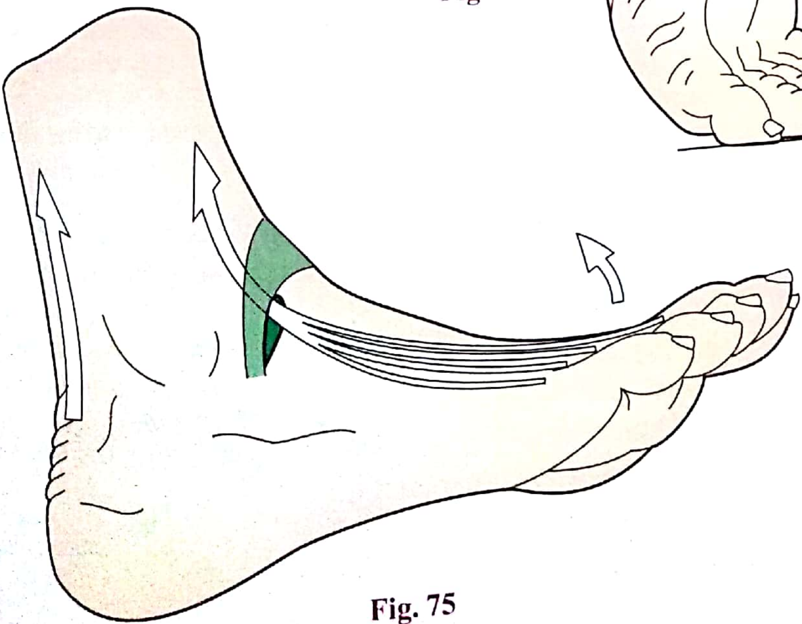
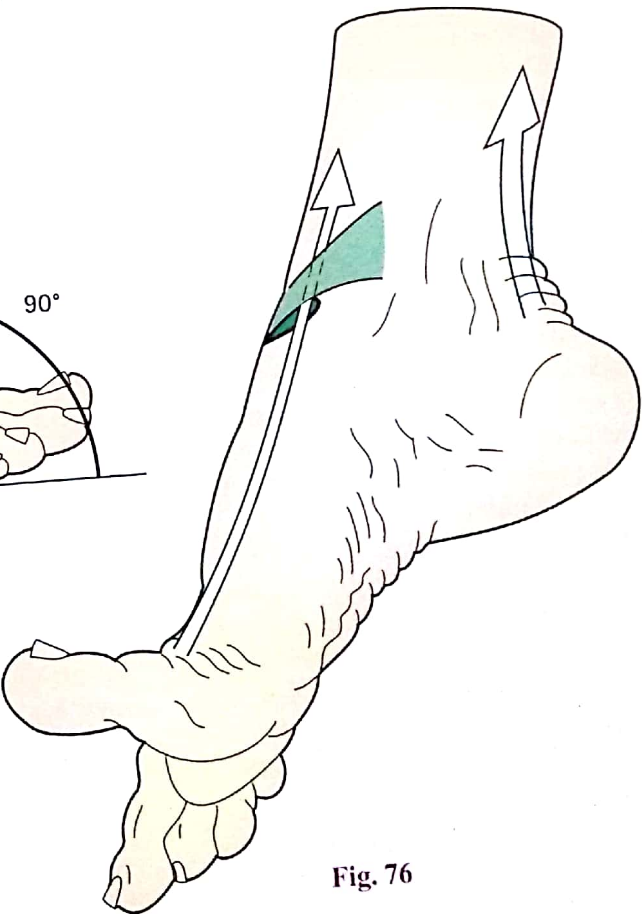


Fig. 72


Fig. 75


Fig. 76

Les loges de la jambe

De même que l'avant-bras contient les muscles extrinsèques de la main et des doigts, la jambe loge les muscles extrinsèques du pied et des orteils. Comme il est facile de le constater sur deux coupes de la jambe, l'une au tiers antérieur **(Fig. 77 : partie inférieure d'une coupe de la jambe droite)**, l'autre à mi-jambe **(Fig. 79 : idem)**, les muscles entourent les deux os de la jambe, le **tibia T** et la **fibula F** (l'ancien péroné). Entre ces deux os est tendue la **membrane interosseuse 1**, qui forme une cloison centrale et la jambe est enveloppée par l'**aponévrose superficielle 2**, qui lui forme un étui continu et inextensible. Du côté interne, l'aponévrose superficielle recouvre directement la face interne du tibia, qui est donc immédiatement sous-cutanée ; du côté externe, par contre, la fibula est située en profondeur et est reliée à l'aponévrose superficielle par **deux cloisons fibreuses** : la **cloison intermusculaire externe 3** et la **cloison antéro-externe 4**.

Ainsi se trouvent constitués **trois espaces et quatre loges (Fig. 78 : vue externe en perspective, le tibia a été sectionné à un niveau supérieur à celui de la fibula)** :

– au niveau du squelette jambier, de la cloison interosseuse et de la cloison antéro-externe se situe la **loge antérieure 1**, qui contient les muscles fléchisseurs de la cheville et les extenseurs des orteils ;

– à la face antéro-externe de la fibula, entre les deux cloisons intermusculaires externe et antéro-interne se situe la **loge antéro-externe 2**, occupée par les muscles fibulaires ;

– en arrière du squelette jambier, de la membrane interosseuse et de la cloison intermusculaire externe se situe la **loge postérieure**, elle-même subdivisée en deux espaces par l'aponévrose profonde 5, tendue du bord interne du tibia au bord postéro-externe de la fibula ;

– elle délimite avec le squelette et la membrane interosseuse la **loge jambière profonde** 3, qui contient les muscles fléchisseurs des orteils et certains muscles extenseurs de l'articulation talo-crurale ;

– en arrière de l'aponévrose profonde se situe la **loge jambière superficielle 4**, limitée par l'aponévrose superficielle et contenant le puissant muscle extenseur de l'articulation talo-crurale, le triceps sural.

La **loge antérieure (Fig. 80 : vue antérieure de la jambe)** est occupée, de dedans en dehors, par quatre muscles :

– le **muscle tibial antérieur 6**, inséré sur le tibia, la moitié interne de la membrane interosseuse **1**, la face profonde de l'aponévrose superficielle dans son quart supérieur 7. Le corps musculaire, occupant la moitié interne de la loge, se prolonge par un tendon puissant **TA**, maintenu à la face antérieure de la cheville par le **ligament annulaire antérieur du cou-de-pied**, formé de deux lames, la **lame supérieure** 8 et la **lame inférieure** 9 ;

– le **muscle long extenseur de l'hallux** 10, situé plus bas que le premier, inséré sur la face interne de la fibula et la membrane interosseuse. Son tendon **EH** est parallèle au précédent et passe sous les deux lames du ligament annulaire antérieur du pied ;

– le **muscle long extenseur des orteils** 11, inséré au-dessus et en dehors du précédent sur la fibula, la membrane interosseuse et la face profonde de l'aponévrose superficielle dans son quart supérieur 12. Son tendon **EO** descend parallèlement en dehors des précédents et passe sous le ligament antérieur du cou-de-pied, du côté externe ;

– le **muscle troisième fibulaire** 13, inconstant, prend son origine sur la moitié inférieure de la face externe de la fibula, et son tendon assez grêle **TF** passe sous le ligament antérieur du cou-de-pied, sur son bord externe.

L'artère tibiale antérieure 14 descend avec ses veines satellites, accolée contre la cloison interosseuse, dans la profondeur de la loge dans laquelle elle a pénétré par un orifice formé par l'ogive de deux os et le bord supérieur de la membrane interosseuse. Elle est accompagnée du **nerf tibial antérieur** 15 (figuré sur les coupes).

La **loge antéro-externe (Fig. 81 : vue externe de la jambe)** contient les deux muscles fibulaires (anciens péroniers latéraux) :

– le **muscle long fibulaire** 16, prenant ses insertions 17 les plus hautes sur la face externe de la fibula, la cloison intermusculaire externe 3, la cloison intermusculaire antéro-externe 4 et la face profonde de l'aponévrose superficielle dans son quart supérieur. Son **tendon** 18 descend vers le bord postérieur de la malléole externe ;

– le **muscle court fibulaire** 19 s'insère au-dessous du précédent sur une zone 20 occupant la face externe de la fibula et les deux cloisons. Son tendon 21 descend parallèlement et en avant du précédent, pour glisser avec lui dans une **coulisse ostéo-fibreuse** au bord postérieur de la malléole externe, dans laquelle ils sont maintenus quelle que soit la position de la cheville. À la pointe de celle-ci, ils changent de direction, vers le bord externe du cuboïde.

L'artère fibulaire 22, accompagnée du **nerf fibulaire** 23 (figuré sur les coupes), pénètre dans la loge à sa partie haute en traversant la cloison externe. Elle envoie une branche à travers la cloison antéro-externe **24** qui s'anastomose à la tibiale antérieure. Elle descend ensuite dans la loge antéro-externe et, à mi-hauteur de la jambe, perfore la cloison antéro-externe 25 pour rejoindre la tibiale antérieure.

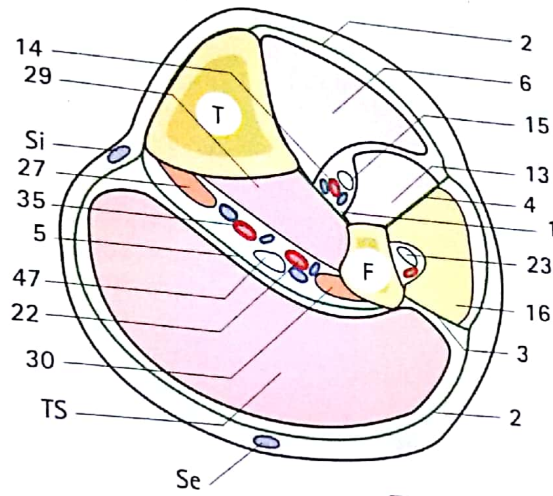


Fig. 77

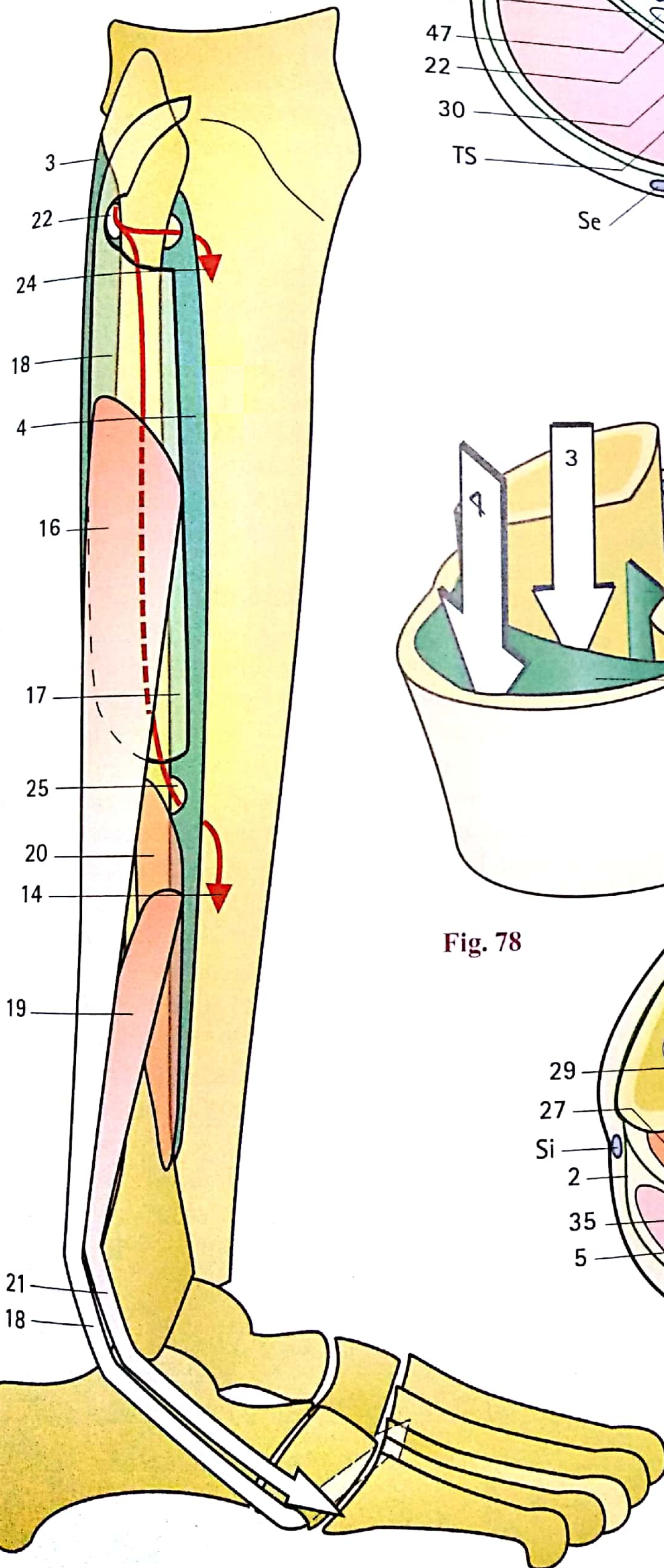


Fig. 81

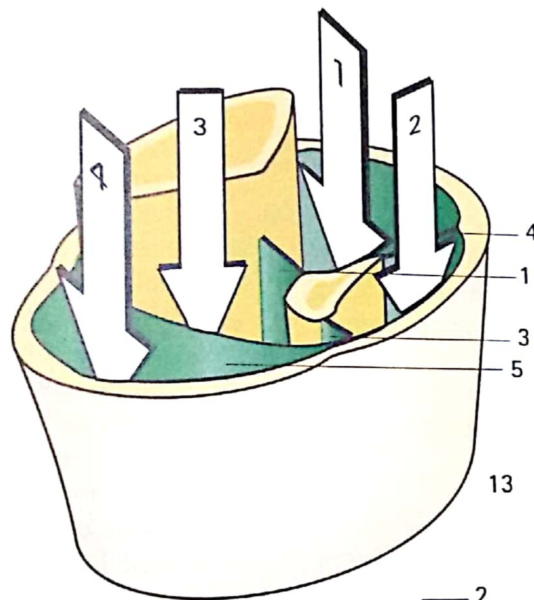


Fig. 78

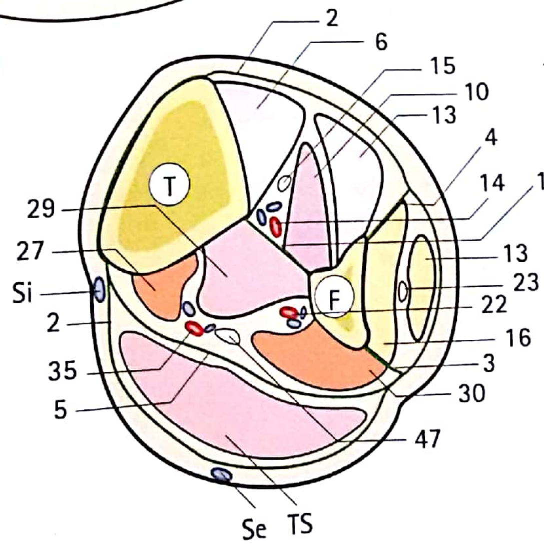


Fig. 79

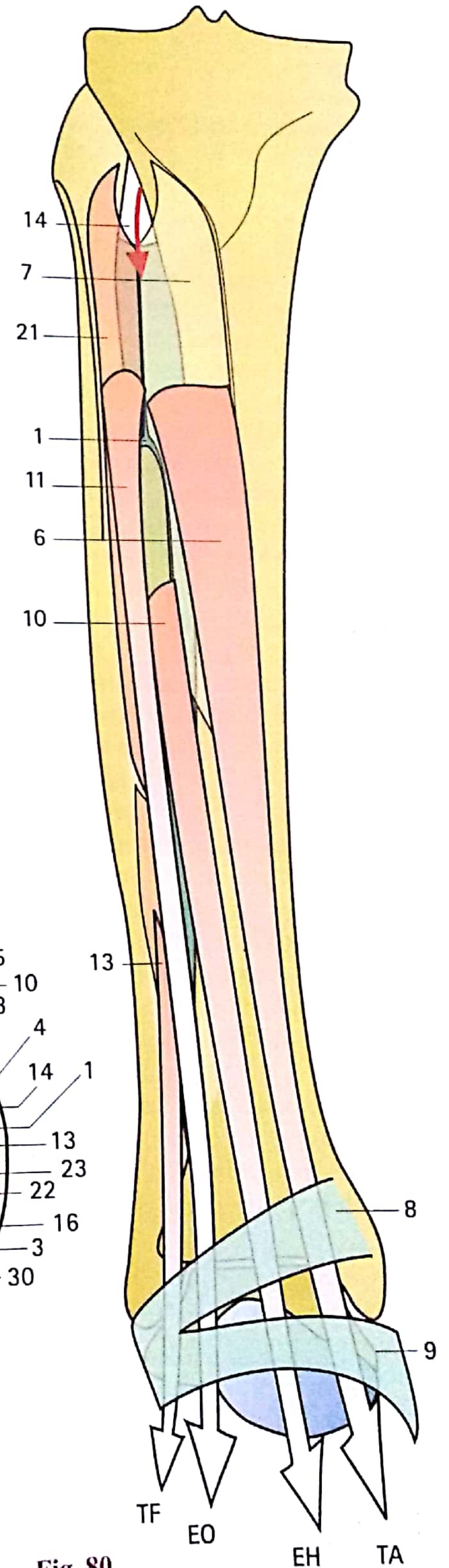


Fig. 80

Les loges de la jambe *(suite)*

L'espace postérieur est composé de deux loges, la loge profonde et la loge superficielle.

La **loge postérieure profonde (Fig. 82 : vue postérieure)** compte quatre muscles :

- le **muscle poplité 26**, qui appartient au genou. Oblique en haut et en dehors, il sort rapidement de la région ;
- le **muscle long fléchisseur des orteils 27**, le plus interne, qui prend une large insertion sur la moitié interne de la face postérieure du tibia. Grâce à une arcade fibreuse **28** étendue jusqu'à la fibula, il prend aussi attache sur cet os. Son tendon **FO** descend et croise le bord postérieur du talus, avant de passer sous le sustentaculum tali du calcanéus ;
- le **muscle tibial postérieur 29** qui s'attache, comme nous l'avons vu (voir Fig. 58, p. 177), sur la membrane interosseuse et à la fois sur les deux os. Son tendon **TP** passe sous l'arcade du long fléchisseur des orteils **(flèche blanche)**, pour glisser au bord postérieur de la malléole médiale et changer de direction, vers l'avant-pied ;
- Le **muscle long fléchisseur de l'hallux 30**, qui s'insère sur la fibula, au-dessous du précédent. Son tendon **FH** passe entre les deux tubercules postérieurs du bord postérieur du talus, avant de glisser à la face inférieure du sustentaculum tali du calcanéus pour rejoindre l'avant-pied.

La **loge postérieur superficielle (Fig. 83 et 84)** est occupée essentiellement par le **triceps sural TS** qui se structure en deux plans : un plan profond et un plan superficiel.

Le **plan profond (Fig. 83)** comporte deux muscles :

- le **muscle soléaire 31**, muscle largement étendu qui prend son origine sur un fort processus **32** s'attachant sur deux lignes **33** situées, l'une au-dessous du soléaire, l'autre sur la tête de la fibula. Entre ces deux insertions est tendue une arcade fibreuse **34** sous laquelle l'artère tibiale postérieure, accompagnée du nerf tibial postérieur **47** (visible sur les coupes), glisse pour pénétrer dans la loge profonde et se bifurquer en tibiale postérieure **35** et fibulaire **22**. Le corps musculaire se termine sur un large processus qui participe à la constitution du tendon calcanéen **36** (voir p. 224) ;
- le **muscle plantaire 37** doté d'un très petit corps musculaire s'attachant sur la coque condylaire externe et le sésamoïde, présente la particularité d'être pourvu d'un tendon 38 de petit calibre, mais très long – pratiquement la longueur de la jambe – suivant le bord interne du soléaire, puis du tendon calcanéen pour aller se fixer avec lui sur le calcanéus. Ce muscle, faiblement extenseur de la cheville, présente, bien qu'inconstant, un grand intérêt, car il représente une « banque de tendon » facile à prélever pour réaliser une greffe tendineuse ;

Le **plan superficiel (Fig. 84)** comporte deux muscles, les **gastrocnémiens** qui s'insèrent au-dessus du genou et sont donc bi-articulaires. Ils ont une origine distincte, mais se réunissent sur la ligne médiane pour se terminer ensemble sur le système aponévrotique du tendon calcanéen (voir p. 224) :

- Le **muscle gastrocnémien médial 39** prend son origine sur la coque condylaire interne et la longue bandelette tendineuse **40** qui s'insère au-dessus du condyle interne. Les fibres musculaires et la bandelette contournent par en dehors les tendons du muscle semi-membraneux **41** et du muscle semi-tendineux **42**, dont ils sont séparés par une bourse séreuse (non figurée) ;
- le **muscle gastrocnémien latéral 43** prend des insertions semblables, au-dessus du condyle externe. Les fibres musculaires et la bandelette tendineuses **44** contournent par en-dedans le tendon du biceps crural **45**.

Une bonne visualisation de ces loges est importante pour comprendre le **syndrome de loge**, fréquent en traumatologie. Une gêne au retour veineux, causée par un traumatisme, peut être cause d'un **œdème des muscles** contenus dans la loge, ce qui augmente la pression dans la loge, et qui par un effet de « cercle vicieux » va, à son tour, aggraver la stase veineuse, donc l'œdème. L'augmentation de la pression dans la loge va finir par interrompre la circulation artérielle, donc *compromettre la vitalité de l'extrémité du membre*, et surtout, va *priver les nerfs inclus dans la loge de leur apport sanguin*, risquant de détruire durablement la conduction nerveuse, et, à terme, de détruire les nerfs. **Le diagnostic de syndrome de loge doit être le plus précoce possible**, afin d'instituer le seul traitement possible : l'aponévrotomie superficielle qui, en faisant tomber la pression dans la loge, interrompt le circulus viciosus.

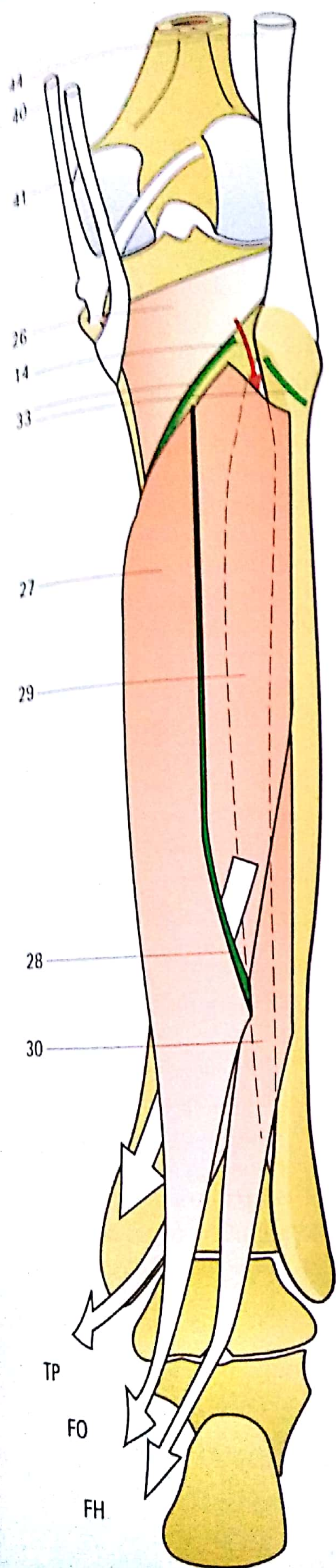


Fig. 82

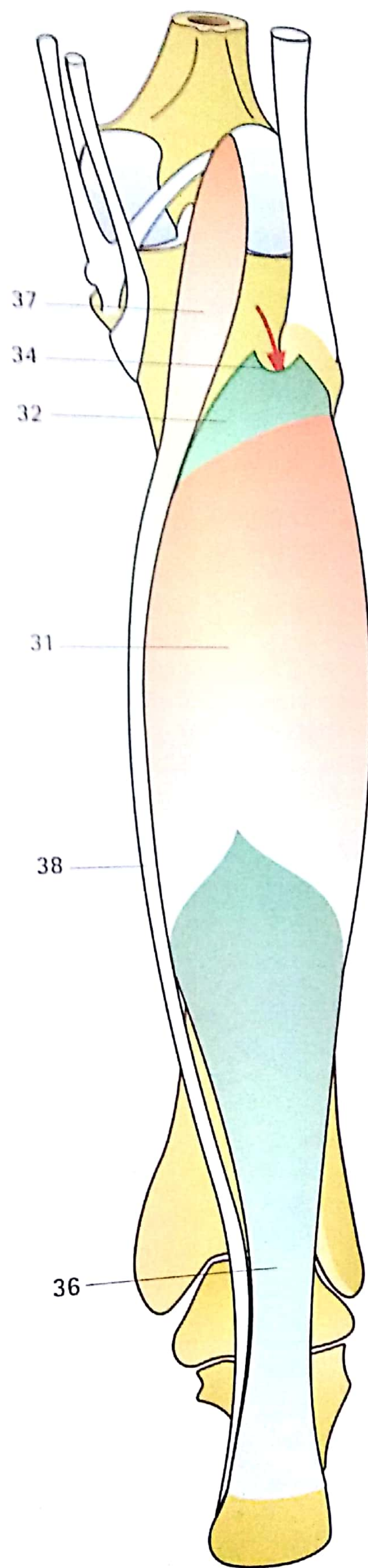


Fig. 83

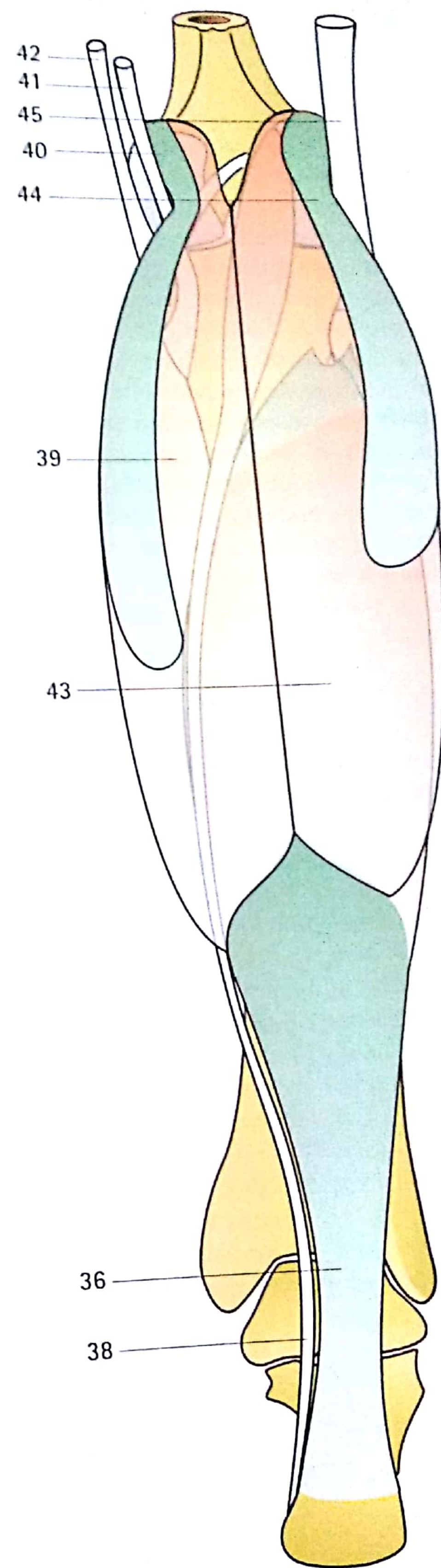


Fig. 84

Muscles interosseux et lombricaux

Les **muscles interosseux** se répartissent comme à la main en muscles **dorsaux** et palmaires (pour le pied, on dit **plantaires**), mais leur disposition est un peu différente **(Fig. 85 : coupe frontale, tranche postérieure)** : les **quatre interosseux dorsaux 1** sont centrés sur le deuxième métatarsien (au lieu du troisième à la main) et se terminent **(flèches blanches)** sur le deuxième orteil (premier et deuxième interosseux) ou sur l'orteil le plus rapproché du deuxième : troisième interosseux sur le troisième orteil, quatrième interosseux sur le quatrième orteil **(Fig. 92)**.
Les **trois interosseux plantaires 2** s'insèrent tous du côté interne des trois derniers métatarsiens et se terminent **(Fig. 93)** sur l'orteil correspondant au métatarsien d'origine.
Le **mode de terminaison des interosseux** du pied **(Fig. 86 : vue dorsale de l'appareil extenseur et Fig. 88 : vue latérale des muscles des orteils)** est semblable à celui de la main :

- sur la **partie latérale de la base de la première phalange 3** ;
- par une **lame tendineuse 4** sur la bandelette latérale **5** du tendon extenseur. En effet, le tendon de l'extenseur commun **E** s'insère comme à la main sur les trois phalanges par des fibres sur les bords de la première phalange **6** (et non pas sur la base) et deux bandelettes latérales **5** pour la base de la troisième phalange ;
- en amont de l'articulation métatarso-phalangienne **(Fig. 87 : vue dorsale)**, le tendon extenseur des deuxième, troisième et quatrième orteils reçoit par son bord externe le grêle tendon **P** du court extenseur des orteils.

Pour compléter la coupe **(Fig. 85)**, à la face dorsale du pied se situent les tendons du muscle long extenseur des orteils **LE**, du long extenseur de l'hallux **h**, et du court extenseur des orteils **CE**.
Comme à la main, il existe **quatre muscles lombricaux 22 (Fig. 85, 87 et 90)** annexés aux tendons du long fléchisseur profond des orteils **19** (homologue du fléchisseur commun profond des doigts). Le tendon de chacun des lombricaux se porte en dedans **(Fig. 97)** pour se terminer **(Fig. 87 et 88)** comme un interosseux : sur la base de la première phalange **8**, et sur la bandelette latérale de l'extenseur **9**.

Le tendon du fléchisseur profond des orteils **19** se comporte comme le FCP des doigts **(Fig. 88 et Fig. 97)** : il passe au contact du fibro-cartilage glénoïdien **10** de l'articulation métatarso-phalangienne, puis perfore le tendon du court fléchisseur plantaire **24** pour se terminer sur la base de la troisième phalange. Le muscle carré plantaire, muscle intrinsèque du pied est donc l'équivalent du fléchisseur commun superficiel des doigts : superficiel, il est perforé par le précédent et se termine sur les faces latérales de la deuxième phalange. Le muscle long fléchisseur profond des orteils fléchit la troisième phalange sur la deuxième **(Fig. 90)**. Le muscle carré plantaire fléchit la deuxième phalange sur la première. Les muscles interosseux et les lombricaux **(Fig. 89)** sont, comme à la main, fléchisseurs de la première phalange et extenseurs des deux dernières. Ils jouent un rôle essentiel dans la stabilisation des orteils : en fléchissant la première phalange, ils donnent un point d'appui solide aux extenseurs des orteils dans leur action de flexion de la cheville. Lorsque muscles interosseux et lombricaux sont insuffisants, il en résulte une **déformation « en marteau »** ou **« en griffe »** des orteils **(Fig. 91)** ; la première phalange n'étant plus stabilisée par les muscles interosseux, elle se place en hyperextension sous la traction de l'extenseur, puis glisse sur la face dorsale de la tête du métatarsien. Secondairement cette déformation est fixée par la **luxation dorsale des interosseux**, au-dessus de l'axe de la métatarso-phalangienne +. En outre, les deux dernières phalanges sont attirées en flexion par le raccourcissement relatif des fléchisseurs et cette déformation est fixée lorsque l'interphalangienne proximale se luxe **(flèche)** entre les bandelettes latérales de l'extenseur, dont l'action s'inverse alors.
Comme à la main, l'attitude des orteils dépend donc de l'équilibre entre les différents muscles. Il apparaît ainsi, comme le dit Duchenne de Boulogne, que seul le court extenseur des orteils **CE** est vraiment extenseur des orteils ; le long extenseur des orteils **LE** étant en réalité des **fléchisseurs de la cheville**, ils auraient eu « avantage » (toujours selon Duchenne de Boulogne) à se fixer directement sur les métatarsiens.

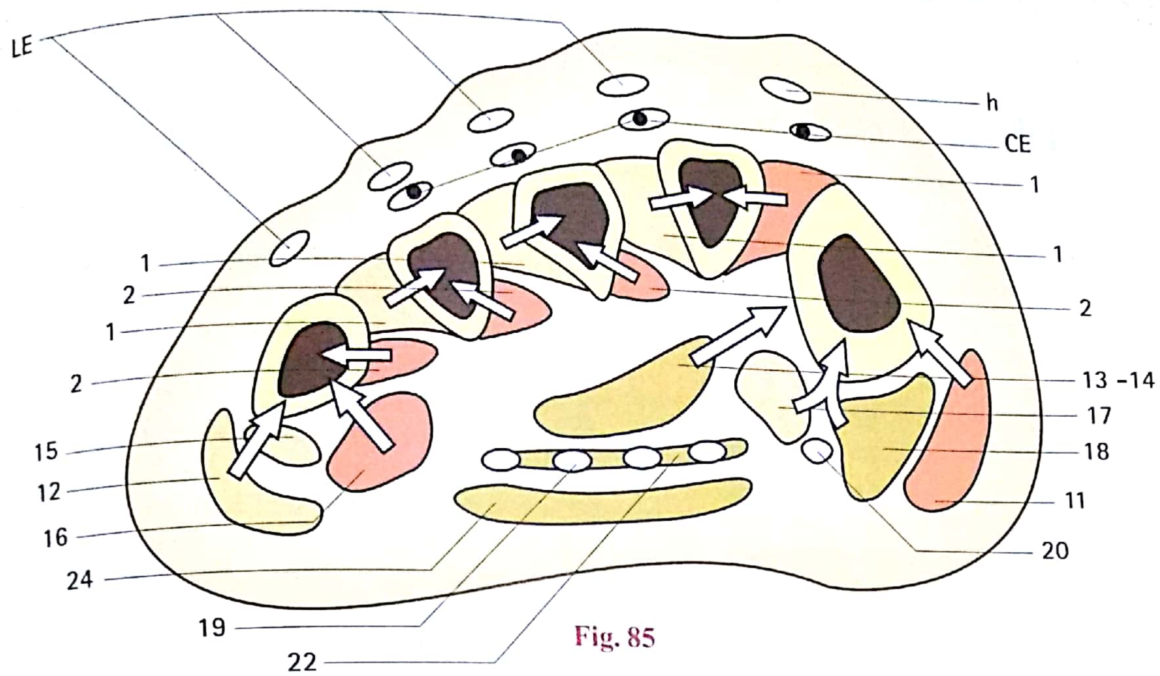


Fig. 85

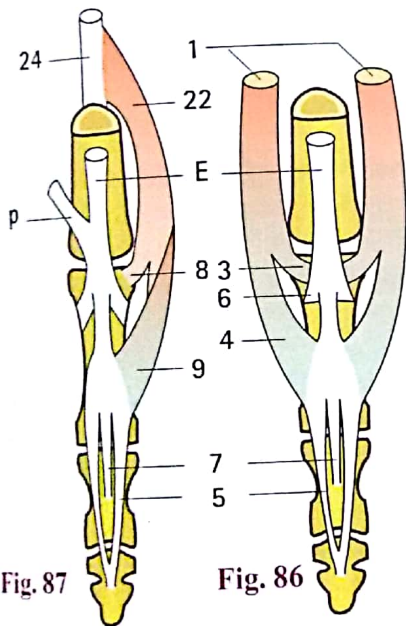


Fig. 87

Fig. 86

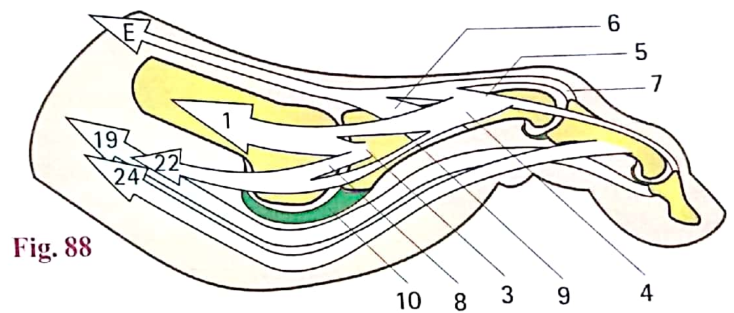


Fig. 88

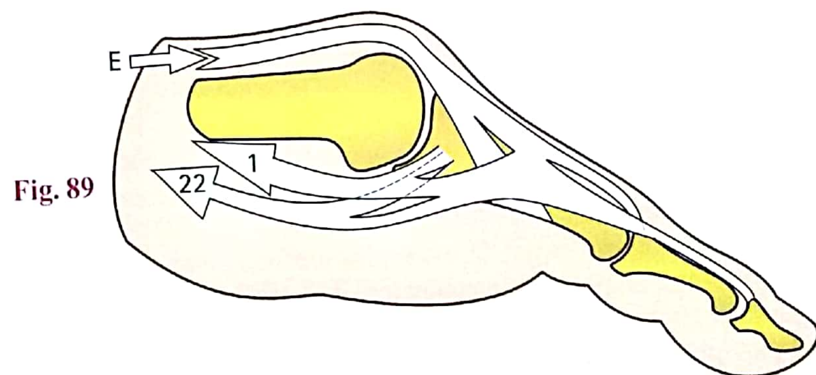


Fig. 89

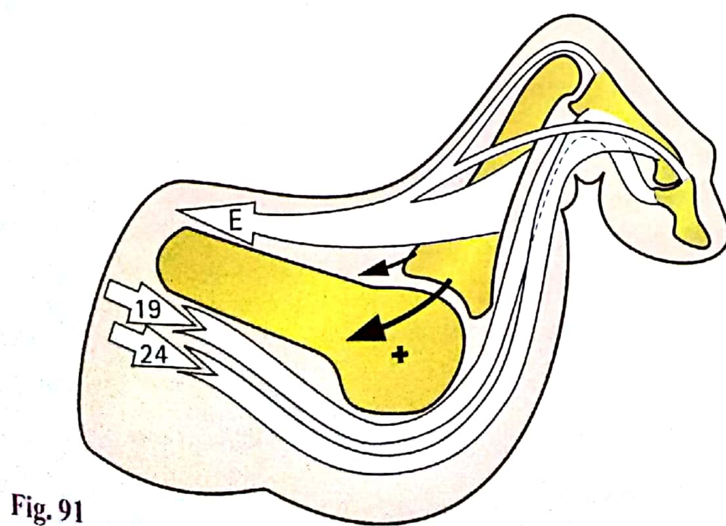


Fig. 91

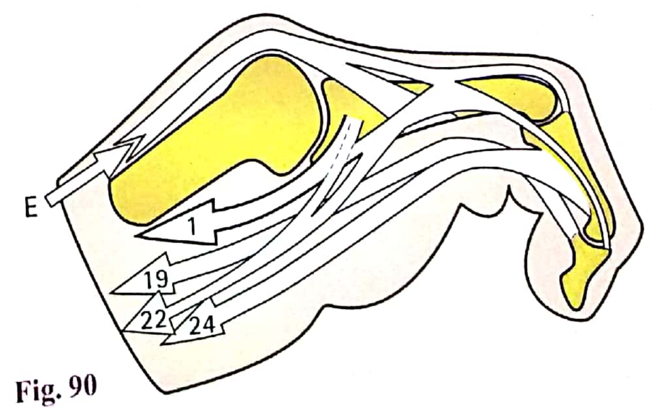


Fig. 90

Muscles de la plante du pied

Les muscles de la plante du pied se disposent, de la profondeur à la superficie, en **trois plans**.

Le plan profond

Il est constitué par les **muscles interosseux dorsaux 1** et **plantaires 2** et les muscles annexés à l'hallux et au cinquième orteil.

- Les **muscles interosseux dorsaux 1 (Fig. 92 : vue inférieure)** possèdent, outre leur action sur la flexion-extension, une action d'écartement des orteils par rapport à l'axe du pied constitué par le deuxième métatarsien et le deuxième orteil. L'écartement de l'hallux est assuré par l'**abducteur de l'hallux 11** – dont les insertions postérieures s'effectuent sur la tubérosité postéro-interne du calcanéus – et l'écartement du cinquième orteil est dû à l'**abducteur du petit orteil 12**. Ces deux muscles sont des équivalents de muscles interosseux dorsaux.
- Les **muscles interosseux plantaires 2 (Fig. 93 : vue inférieure)** rapprochent les trois derniers orteils du deuxième. L'hallux est rapproché de l'axe du pied par l'adducteur de l'hallux, constitué de deux chefs :

– l'**adducteur oblique 13**, qui prend origine sur les os du tarse antérieur ;

– l'**adducteur transverse 14**, qui s'attache sur le ligament glénoïdien des troisième, quatrième et cinquième articulations métatarso-phalangiennes et sur le ligament intermétatarsien profond. Il attire la première phalange de l'hallux directement en dehors et joue un rôle de soutien de l'arche antérieure (voir Fig. 28, p. 241).

- Les **muscles annexés au cinquième orteil (Fig. 94 : vue inférieure)** sont au nombre de trois et sont contenus dans la loge plantaire externe :

– l'**opposant du petit orteil 15** est le plus profond ; étendu du tarse antérieur au cinquième métatarsien, il a un rôle analogue, bien qu'à un moindre degré, à celui de l'opposant du cinquième doigt ; il creuse la voûte et l'arche antérieure ;

– les deux autres muscles se fixent tous deux sur le tubercule externe de la base de la première phalange. Ce sont : le **court fléchisseur du petit orteil 16**, qui prend origine sur le tarse antérieur et l'**abducteur du cinquième orteil 12** déjà vu, dont les insertions postérieures s'effectuent **(Fig. 95)** sur la tubérosité postéro-externe du calcanéus et sur le styloïde du cinquième métatarsien. C'est l'un des soutiens de l'arche externe (voir Fig. 18, p. 239).

- Les **muscles annexés à l'hallux (Fig. 94)**, au nombre de trois, sont contenus dans la loge plantaire interne (sauf l'abducteur). Ils se fixent sur les tubercules latéraux de la base de la première phalange et sur les deux os sésamoïdes annexés à la métatarso-phalangienne de l'hallux. C'est pourquoi on les appelle aussi les muscles sésamoïdiens :

– du côté interne, sésamoïde et phalange reçoivent le chef interne du **court fléchisseur de l'hallux 17** et l'**adducteur 11**, qui prend origine sur la tubérosité postéro-interne du calcanéus **(Fig. 95)** et constitue l'un des soutiens de l'arche interne (voir Fig. 7, p. 237) ;

– du côté externe, sésamoïde et phalange reçoivent les deux chefs de l'**adducteur 13** et **14** et le chef externe du **court fléchisseur de l'hallux 18**, qui prend origine sur les os du tarse antérieur.

Les muscles sésamoïdiens sont des **fléchisseurs puissants de l'hallux** : ils jouent un rôle important dans la stabilisation de l'hallux. Leur insuffisance détermine la griffe de l'hallux, sous l'action de l'extenseur propre. Ils sont aussi très actifs dans le dernier temps du pas (voir Fig. 50, p. 247).

Le plan moyen

Il est constitué par les **muscles longs fléchisseurs (Fig. 96)**. Le **long fléchisseur des orteils 19** croise par en-dessous le **long fléchisseur de l'hallux 20** à la sortie du canal calcanéen. Peu après, ils échangent une **anastomose tendineuse 21** puis le fléchisseur commun se divise en quatre tendons destinés aux quatre derniers orteils. Les **lombricaux 22** naissent **(Fig. 97)** de deux tendons voisins sauf le premier **22'**. Chaque tendon est perforant et se termine sur la troisième phalange. La traction oblique de ces tendons est compensée par un muscle aplati tendu dans l'axe de la plante du pied **(Fig. 97)** entre les tubérosités postérieures du calcanéus et le bord externe du tendon du cinquième orteil : c'est le muscle **carré plantaire 23**. Sa contraction simultanée corrige la désaxation des tendons.

Le **long fléchisseur de l'hallux 20 (Fig. 94 et 96)** se glisse entre les deux sésamoïdes pour se fixer sur la deuxième phalange de l'hallux, qu'il fléchit puissamment.

Le plan superficiel

Il est représenté **(Fig. 95)** par un seul muscle, contenu comme le fléchisseur commun dans la loge plantaire moyenne, le **court fléchisseur plantaire des orteils 24**, fixé en arrière sur les tubérosités postérieures du calcanéus et destiné aux quatre derniers orteils. C'est l'équivalent du FCS des doigts. Ses tendons sont perforés **(Fig. 97)** et se fixent sur la deuxième phalange, qu'ils fléchissent.

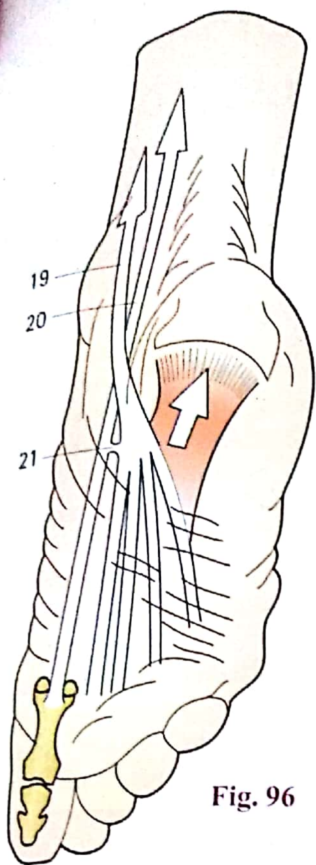


Fig. 96

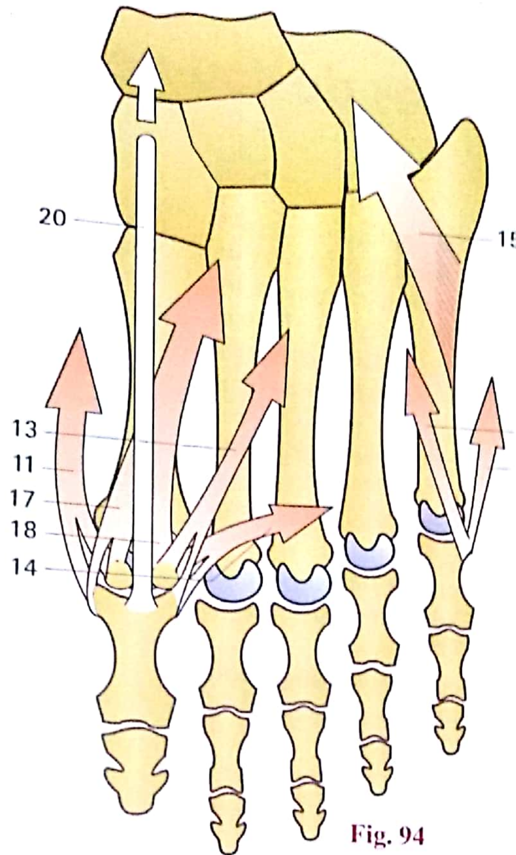


Fig. 94

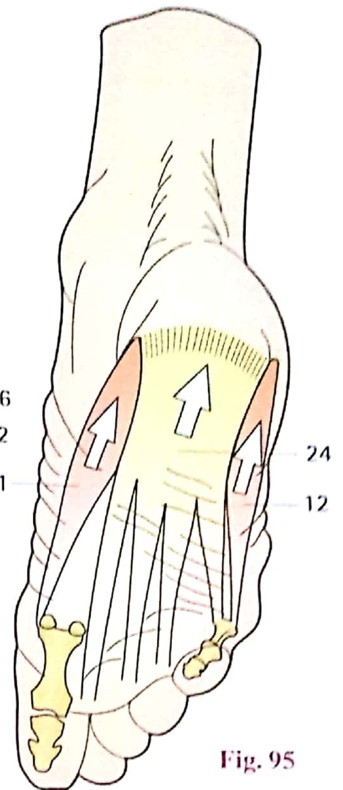


Fig. 95

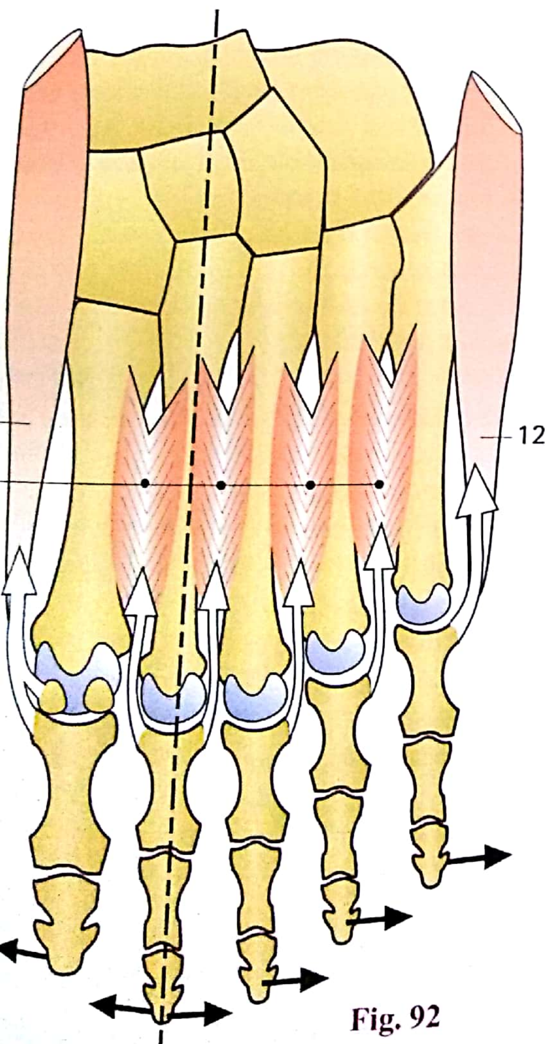


Fig. 92

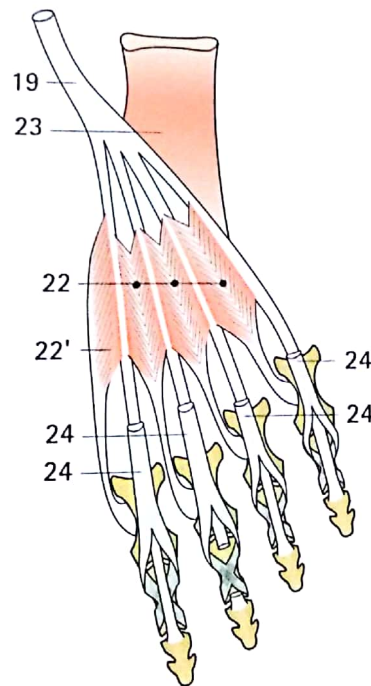


Fig. 97

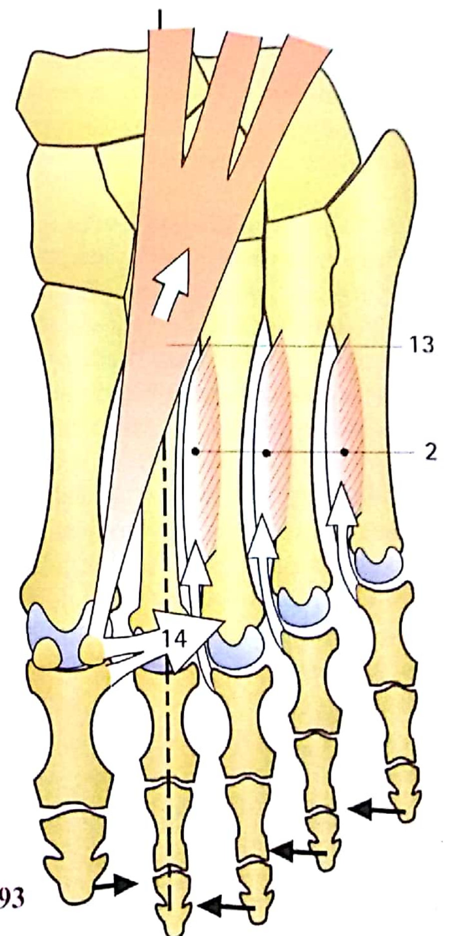


Fig. 93

Les légendes sont communes à toutes les figures et à celles de la page précédente.

Coulisses tendineuses du cou-de-pied et de la plante

Le **rétinaculum du cou-de-pied (Fig. 98)** applique les quatre tendons antérieurs contre le squelette, dans la concavité de la face antérieure du cou-de-pied, leur servant de **poulie de réflexion** quel que soit le degré de flexion de la cheville. Partant en dehors du plancher du sinus du tarse, sur la face supérieure du grand processus du calcanéus, ce ligament se divise aussitôt en deux lames divergentes :

- un **rétinaculum moyen a** qui va se perdre sur le bord interne du pied ;
- un **rétinaculum supérieur b** qui se termine sur la crête tibiale près de la malléole médiale.
- en dedans, elle est dédoublée par le **tendon du tibial antérieur 1** dont la gaine séreuse remonte à deux travers de doigts au-dessus de son bord supérieur **s** ;
- en dehors, elle est doublée en profondeur par le **rétinaculum inférieur** dont les fibres commencent et finissent dans le sinus du tarse, formant ainsi **deux boucles** ;
- la **fronde interne**, qui contient le tendon du **long extenseur de l'hallux 2** entouré d'une gaine séreuse qui déborde à peine le ligament annulaire au-dessus ;
- la **fronde** externe, destinée aux tendons du **long extenseur des orteils 3** et du **troisième fibulaire 4** enveloppés dans une gaine séreuse commune remontant un peu plus haut que la précédente.

Tous les autres tendons passent par les **gouttières rétromalléolaires**.

En arrière de la malléole externe se situe la gouttière rétromalléolaire externe **(Fig. 99 : vue externe)** : dans une coulisse ostéo-fibreuse **5**, émanant du ligament annulaire externe, deux tendons glissent parallèlement, celui du court fibulaire **6** en haut et en avant, et celui du long fibulaire **7** en arrière et en bas. Se réfléchissant sur la pointe de la malléole, ils sont ensuite maintenus sur la face externe du calcanéus par deux coulisses ostéo-fibreuses **8** et **9** prenant appui sur le tubercule des fibulaires **10**. Leur gaine séreuse commune se dédouble à partir de ce point. Le court fibulaire se fixe alors sur le styloïde du cinquième métatarsien **11** et la base du quatrième métatarsien. Un petit segment **12** en a été réséqué pour laisser voir le tendon du long fibulaire au moment où il change de direction pour s'engager dans la gouttière du cuboïde **13**. On le retrouve **14** ensuite à la plante du pied **(Fig. 100 : vue inférieure du squelette du pied)**, entouré d'une nouvelle gaine séreuse, se dirigeant obliquement en avant et en dedans dans une autre coulisse ostéo-fibreuse constituée en haut par le squelette, en bas par les fibres du faisceau superficiel du ligament calcanéo-cuboïdien plantaire (faisceau profond **15**) tendues du calcanéus **16** au cuboïde et à la base de tous les métatarsiens + et par les expansions terminales du tendon du tibial postérieur **17**. Le tendon du long fibulaire se fixe sur la base du premier métatarsien **18**, envoyant des expansions au deuxième métatarsien et au premier cunéiforme. Il présente presque constamment à son entrée dans la gouttière un os sésamoïde **19** qui facilite sa réflexion.

La face plantaire du tarse est donc tapissée de **trois systèmes fibreux (Fig. 100)** :

- les fibres **longitudinales** disposées en deux nappes du grand ligament calcanéo-cuboïdien plantaire ; sur le schéma seule la nappe profonde est visible **15** ;
- les fibres **obliques en avant et en dedans** du tendon du long fibulaire **14** ;
- les fibres **obliques en avant et en dehors** des expansions du tendon du tibial postérieur **17**, destinées à tous les os du tarse et du métatarse sauf les deux métatarsiens extrêmes.

En arrière de la malléole interne (Fig. 101 : vue interne) glissent dans des coulisses et des gaines distinctes, émanations du ligament annulaire interne, **trois tendons** qui sont disposés d'avant en arrière et de dedans en dehors :

- le **tibial postérieur 19**, au contact de la malléole médiale. Après s'être réfléchi dans sa coulisse **20** sur la pointe de la malléole, il se fixe sur le tubercule du scaphoïde **21** et envoie de nombreuses expansions plantaires **17** ;
- le **long fléchisseur des orteils 22** glisse contre le précédent puis contre le bord interne du sustentaculum tali **23** (voir **aussi Fig. 103)**, avant de croiser par en dessous **24** le tendon du long fléchisseur de l'hallux ;
- le **long fléchisseur de l'hallux 25** passe d'abord entre les deux tubercules postérieurs du talus **26** (voir aussi p. 166), puis sous la console du sustentaculum tali **27** (voir aussi Fig. 103). Il change ainsi deux fois de direction.

Deux coupes frontales (tranches antérieures, côté droit), dont le niveau est donné par les flèches A et B sur les figures 99 et 101, illustrent bien les dispositions des tendons et de leur gaine dans les gouttières rétromalléolaires : la coupe A **(Fig. 102)** intéresse les malléoles, la coupe B **(Fig. 103)**, plus antérieure, se situe au niveau du sustentaculum tali et du tubercule des fibulaires. On retrouve les muscles adducteur de l'hallux **28**, abducteur du cinquième orteil **31**, carré plantaire **29**, et court fléchisseur plantaire des orteils **30**.

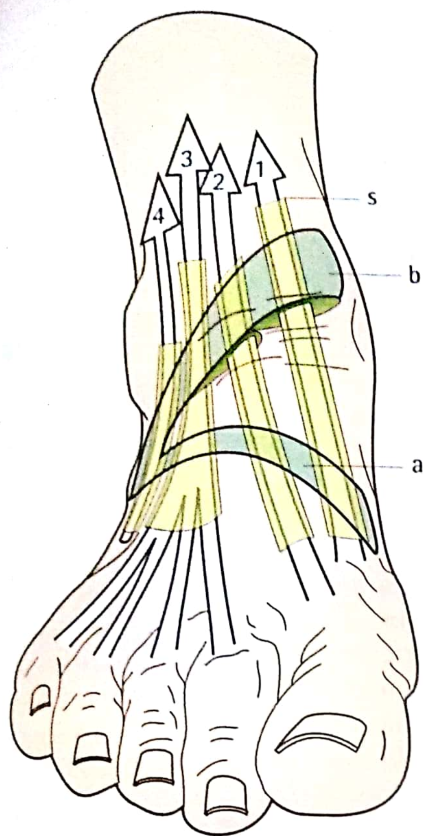


Fig. 98

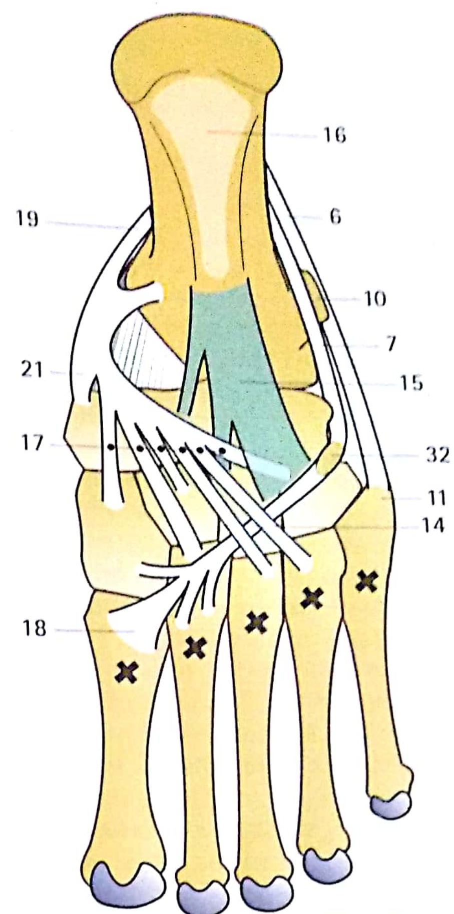


Fig. 100

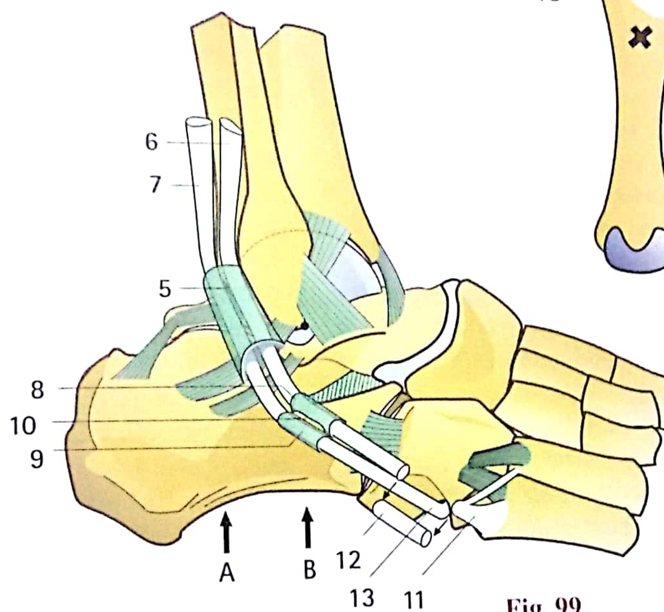


Fig. 99

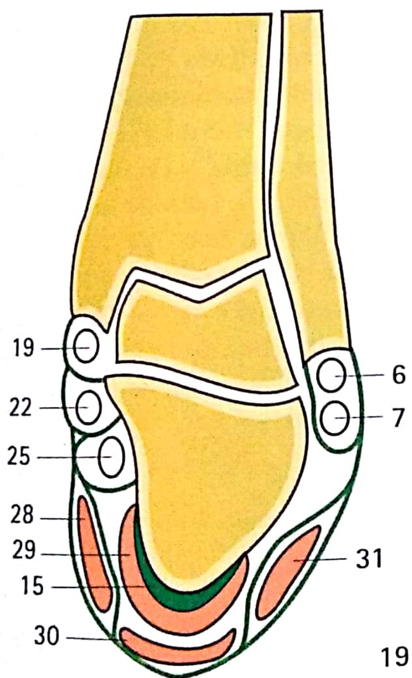


Fig. 102

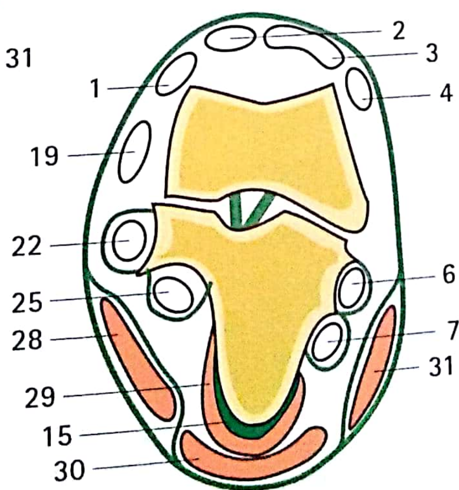


Fig. 103

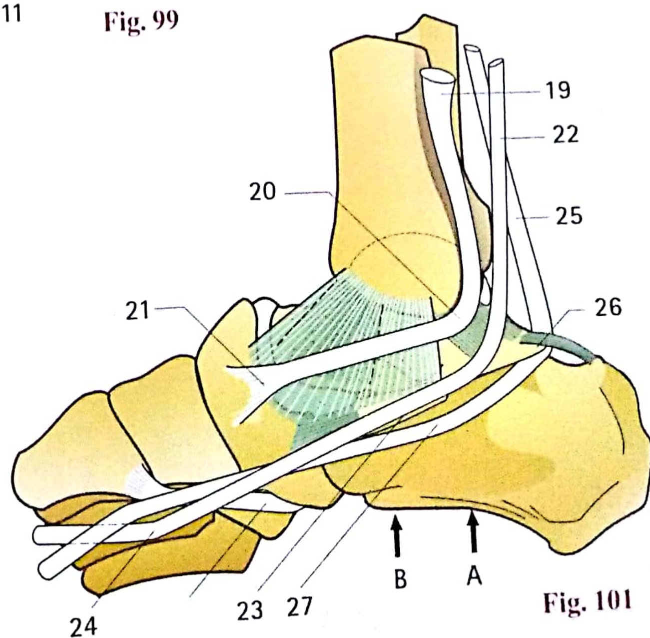


Fig. 101

Les fléchisseurs de la cheville

La mobilisation du pied et de l'arrière-pied se fait grâce aux muscles fléchisseurs et extenseurs de la cheville, **agissant par rapport aux axes du complexe articulaire du tarse postérieur**, tels que nous les avons définis à propos du cardan hétérocinétique (Fig. 55 p. 201). Il nous semble en effet préférable d'abandonner l'ancien schéma d'Ombredane **(Fig. 105)** où les axes **XX'** et **ZZ'** étaient perpendiculaires, car il ne correspond pas à la réalité. Par définition, les axes **XX'** et **UU'** du cardan hétérocinétique ne sont pas perpendiculaires entre eux, ce qui introduit des **directions préférencielles** de mouvements, caractère encore renforcé par la répartition inégale des muscles. Les deux axes du cardan déterminent **quatre quadrants** dans lesquels se répartissent **dix muscles et treize tendons (Fig. 104)**.
Tous les muscles situés en avant de l'axe transversal **XX'** sont **fléchisseurs de la cheville**, mais on peut les disposer en **deux groupes** par rapport à l'axe de Henke **UU'** :

- les deux muscles situés *en dedans de cet axe*, à savoir le **long extenseur de l'hallux EH** et le **tibial antérieur TA** sont en même temps *adducteurs* et *supinateurs*, d'autant plus qu'ils sont plus éloignés de cet axe : le tibial antérieur est donc plus adducteur-supinateur que le long extenseur de l'hallux ;
- les deux muscles situés *en dehors de cet axe*, à savoir le **long extenseur des orteils LE** et le **troisième fibulaire TF** sont en même temps abducteurs et pronateurs. Pour la même raison, le fibulaire est plus abducteur-pronateur que le long extenseur.

Pour obtenir une **flexion pure de la cheville,** sans composante d'adduction-supination ou d'abduction-pronation, il faut donc que ces deux groupes musculaires entrent en action simultanément et de façon équilibrée ; ils sont alors **antagonistes-synergiques**. (Ces actions peuvent être reproduites sur le modèle mécanique du pied en fin de volume.)

Parmi les muscles quatre fléchisseurs de la cheville, deux s'insèrent directement sur le tarse ou le métatarse :

- le **tibial antérieur TA (Fig. 106)** se fixe sur le premier cunéiforme et le premier métatarsien ;
- le **troisième fibulaire TF (Fig. 107)**, muscle inconstant, mais fréquent (90 % des cas), s'insère sur la base du cinquième métatarsien.

Leur action sur le pied est donc directe et ne nécessite aucun auxiliaire.
Il n'en est pas de même pour les deux autres muscles fléchisseurs de la cheville : le **long extenseur des orteils LE** et le **long extenseur de l'hallux EH**, qui agissent par l'intermédiaire des orteils : si les orteils sont stabilisés en rectitude ou en flexion **(Fig. 107)** par les interosseux **Ix**, l'extenseur commun est fléchisseur de la cheville ; mais si les interosseux deviennent insuffisants, la flexion de la cheville se fera au prix d'une *griffe des orteils* **(Fig. 111)**. De même **(Fig. 106)**, la stabilisation de l'hallux par les muscles sésamoïdiens **S** permet à l'extenseur propre de fléchir la cheville. En cas d'insuffisance des sésamoïdiens, l'action de l'extenseur propre sur la cheville s'accompagnera d'une *griffe de l'hallux* **(Fig. 109)**.
Lorsque les muscles de la loge antérieure de la jambe sont paralysés ou insuffisants, éventualité relativement fréquente en pathologie, la pointe du pied ne peut être relevée **(Fig. 108)** : on dit alors qu'il existe un « **pied équin** » (le cheval, *equus* en latin, marche sur le bout des doigts). Lors de la marche, le sujet est obligé de lever haut la jambe pour que la pointe du pied n'accroche pas le sol : c'est la démarche « en steppant », qui vient de l'anglais, *step*, qui veut dire « pas ». Dans certains cas, le muscle long extenseur conserve une certaine efficacité **(Fig. 109)** : le pied, bien que tombant, est dévié en dehors ; il s'agit alors d'un pied « valgus équin ».

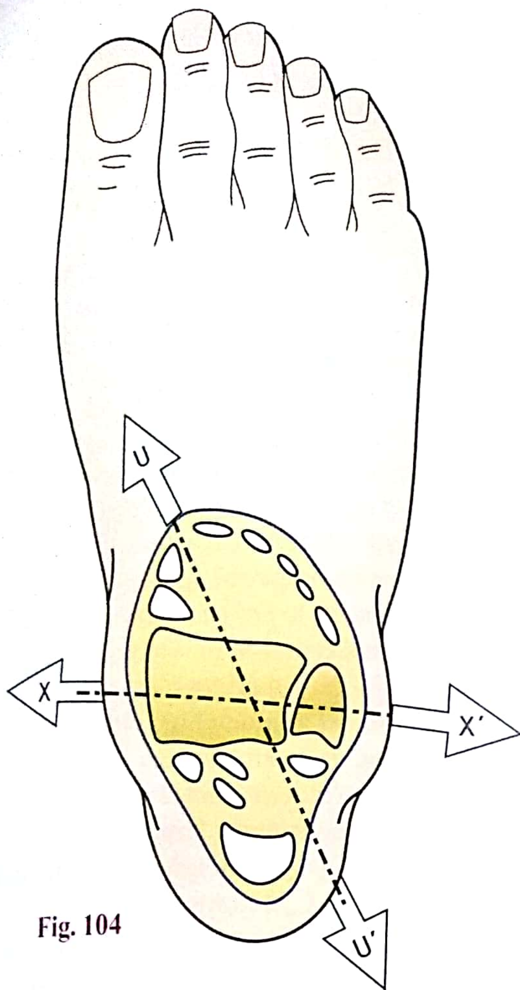


Fig. 104

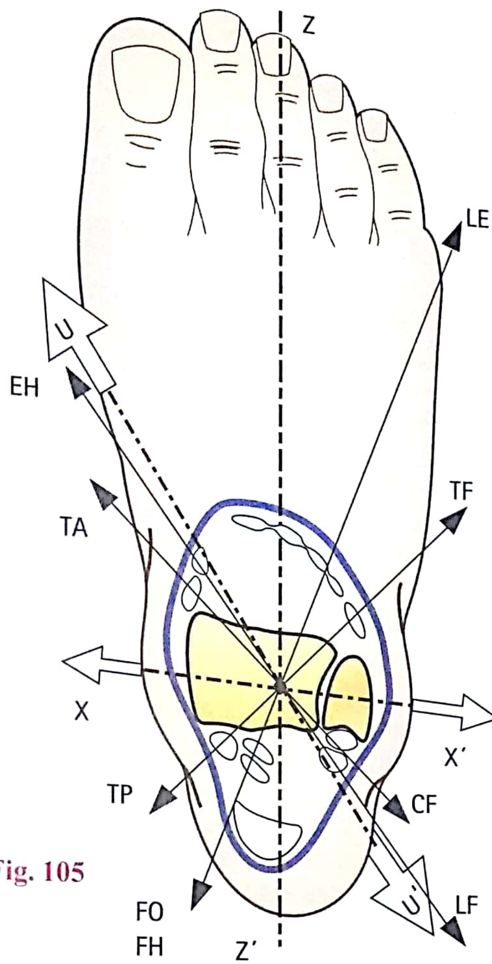
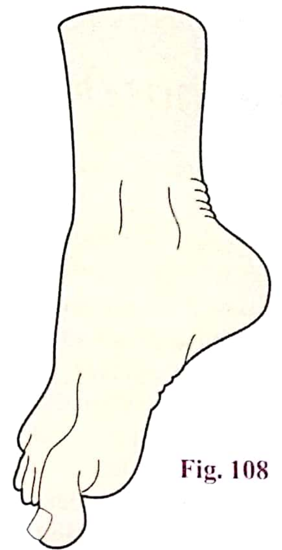
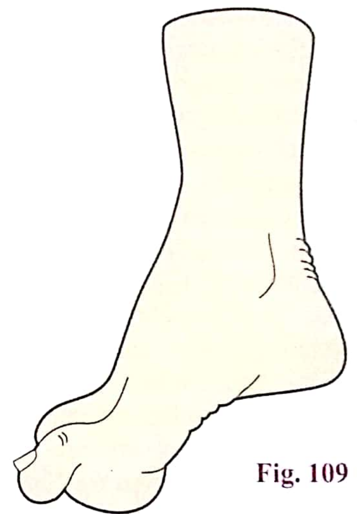


Fig. 105


Fig. 108


Fig. 109

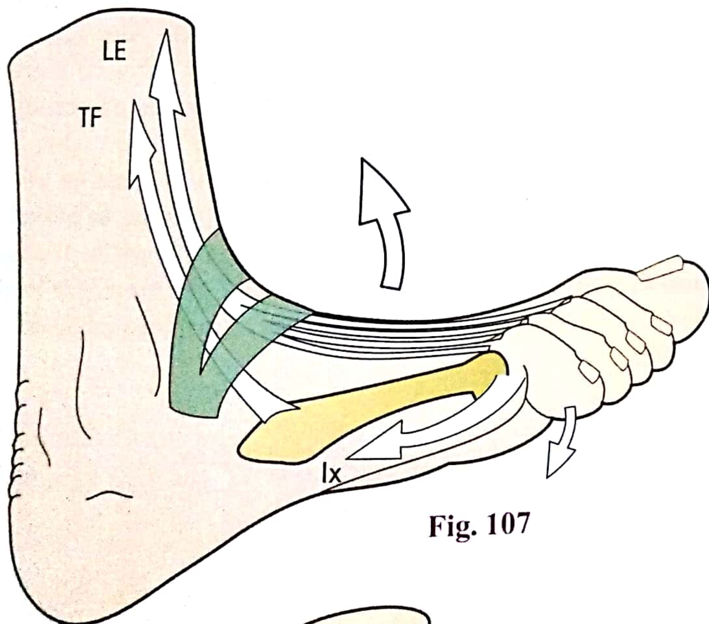
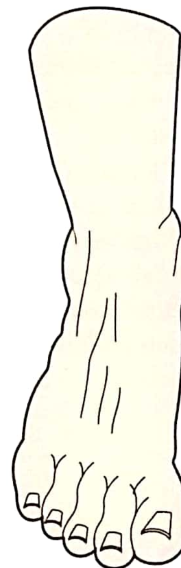


Fig. 107


Fig. 110

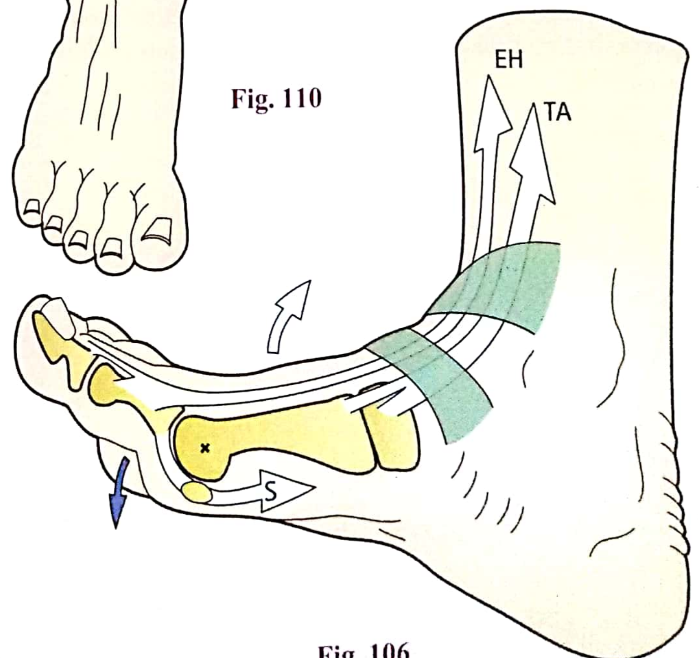
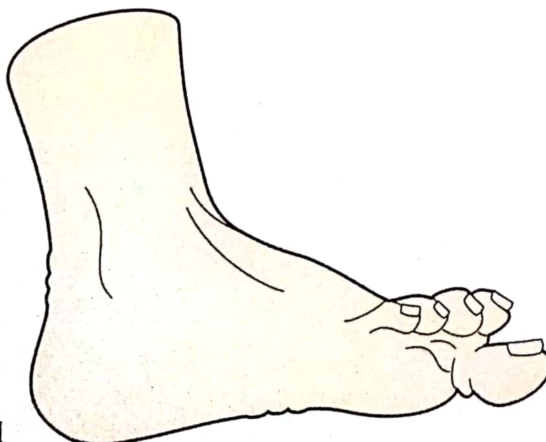


Fig. 106


Fig. 111

Le muscle triceps sural

Les muscles extenseurs de la cheville passent tous en arrière de l'axe **XX'** de flexion-extension (Fig. 105 p. 221). En théorie, il existe donc **six muscles extenseurs de l'articulation talo-crurale** (sans compter le muscle plantaire qui est fonctionnellement négligeable). En pratique, *seul le triceps est efficace* : c'est d'ailleurs l'un des plus puissants muscles du corps – après le grand fessier et le quadriceps. D'autre part, sa position sensiblement axiale fait de lui avant tout *un extenseur*.

Comme son nom l'indique, le **triceps sural** est constitué de *trois corps musculaires* **(Fig. 112 : vue postérieure)** possédant un tendon terminal commun, le **tendon calcanéen 1**, qui se fixe sur la face postérieure du calcanéum (voir page suivante).

De ces trois chefs, un seul est mono-articulaire, le **soléaire 2** : il s'attache à la fois sur le tibia et la fibula et sur l'arcade fibreuse du soléaire 3 (vue ici en transparence) qui réunit ces deux insertions. Muscle profond, il n'apparaît qu'à la partie basse de la jambe de part et d'autre du tendon calcanéen.

Les deux autres chefs sont bi-articulaires ; ce sont les gastrocnémiens. Le **gastrocnémien externe 4** se fixe au-dessus du condyle externe du fémur et sur la coque condylairee externe qui contient parfois un sésamoïde. Le **gastrocnémien interne 5** se fixe de même au niveau du condyle et de la coque condylaire internes. Les deux corps charnus convergent sur la ligne médiane, formant le V inférieur du losange poplité 10. Ils sont maintenus latéralement par les tendons des muscles ischio-jambiers, dont la divergence forme le V supérieur renversé du losange poplité : **biceps 6** en dehors, **muscles de la patte d'oie 7** en dedans. Le glissement entre les gastrocnémiens et les tendons des ischio-jambiers est facilité par une **bourse séreuse** interposée à leur point de croisement : la bourse séreuse du semi-tendineux et du gastrocnémien médial 8 est constante, la bourse externe du biceps et du gastrocnémien latéral 9 est inconstante ; elles sont à l'origine des kystes poplités. Muscles gastrocnémiens et soléaire se terminent sur un système aponévrotique complexe, décrit page suivante, qui donne naissance au tendon calcanéen proprement dit.

La course des différents chefs du triceps **(Fig. 113 : vue de profil)** est nettement inégale : la course du soléaire **Cj** est de 44 mm, la course des gastrocnémiens **Cs** est de 39 mm. Cela s'explique par le fait que l'efficacité des muscles gastrocnémiens, muscles bi-articulaires, dépend étroitement du degré de flexion du genou **(Fig. 114 : vue de profil, genou fléchi)** : entre la flexion et l'extension extrêmes, le déplacement de l'insertion supérieure des gastrocnémiens entraîne un allongement ou un raccourcissement relatif **e** égal ou supérieur à leur course **Cj**. Il s'ensuit que lorsque le genou est étendu **(Fig. 115)**, les gastrocnémiens, étirés passivement, peuvent donner leur puissance maximum. Cette disposition permet de transférer sur la cheville une partie de la puissance du quadriceps. Par contre, lorsque le genou est fléchi **(Fig. 117)**, les gastrocnémiens complètement détendus – **e** est plus grand que **Cj** –perdent toute efficacité : seul le soléaire intervient, mais sa puissance serait insuffisante pour assumer la marche, la course ou le saut, si ces activités n'impliquaient nécessairement l'extension du genou. À noter que les muscles gastrocnémiens ne sont pas pour autant fléchisseurs du genou.

Tous les mouvements qui comportent à la fois une extension de la cheville et du genou comme le fait de grimper **(Fig. 116)** ou de courir **(Fig. 118 et 119)** favorisent la mise en jeu des muscles gastrocnémiens. Le triceps sural donne sa **puissance maximum** lorsque, partant de la position cheville fléchie et genou étendu **(Fig. 118)**, il se contracte pour étendre la cheville **(Fig. 119)** et donner l'**impulsion motrice** lors du dernier temps du pas.

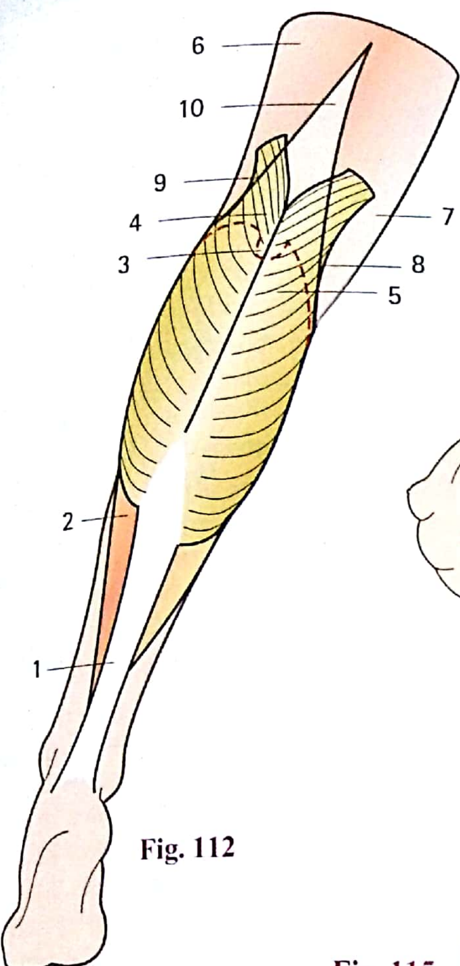
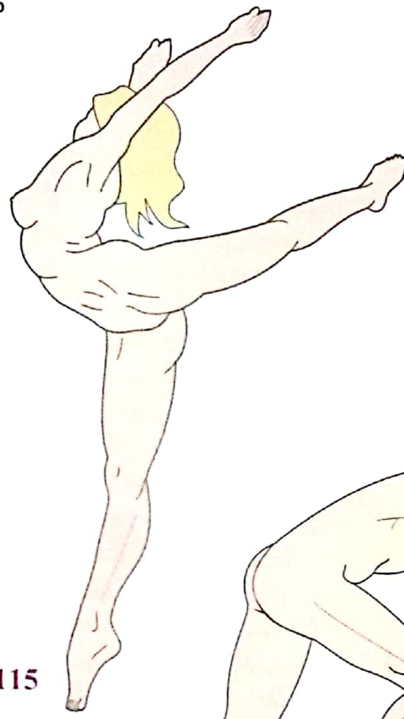
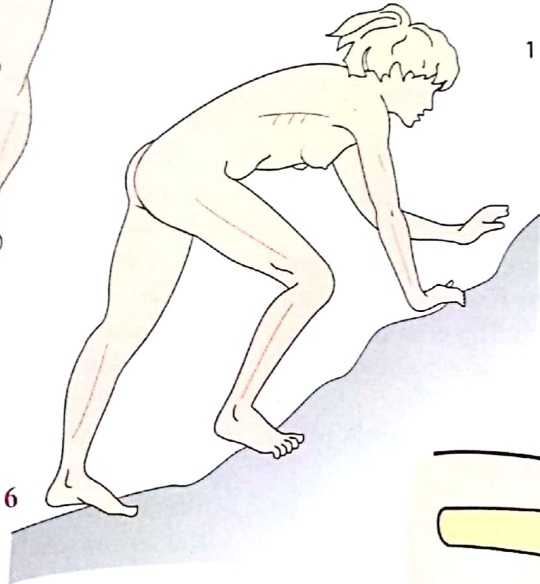


Fig. 112


Fig. 115


Fig. 116

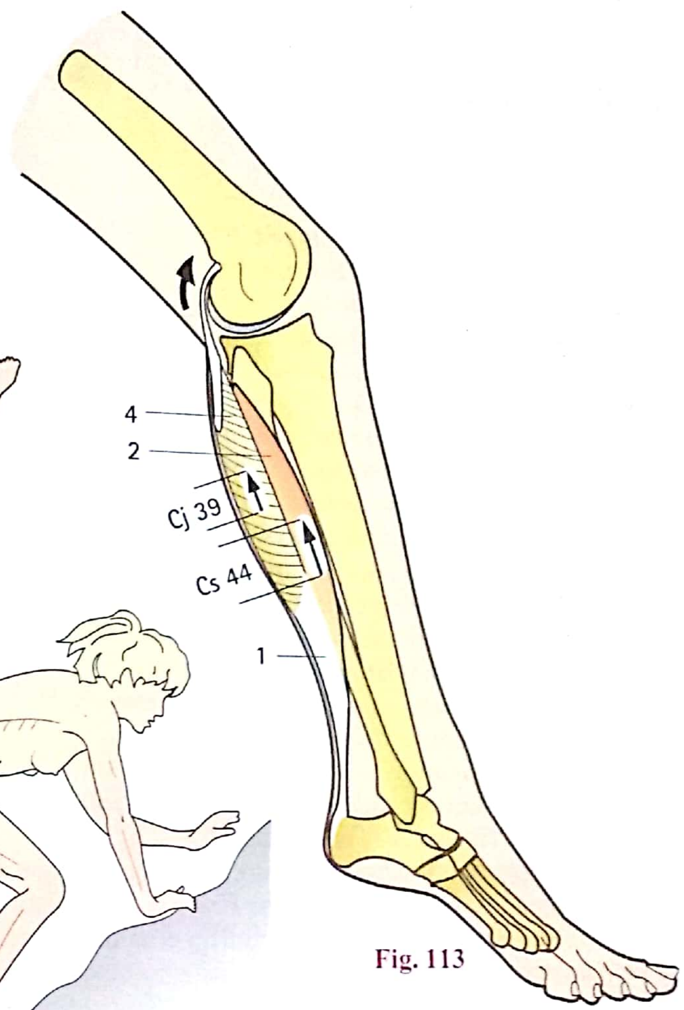


Fig. 113

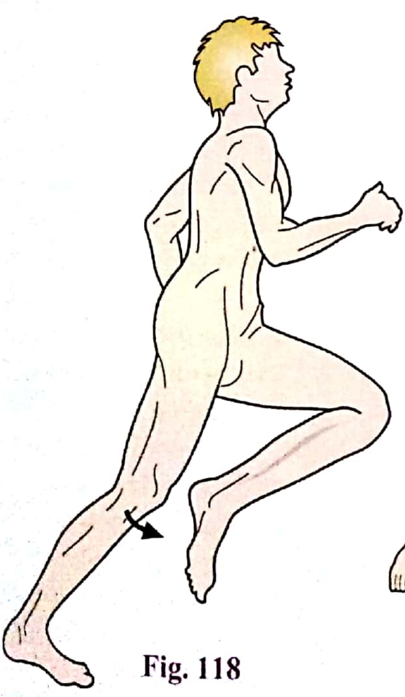

Fig. 118


Fig. 119

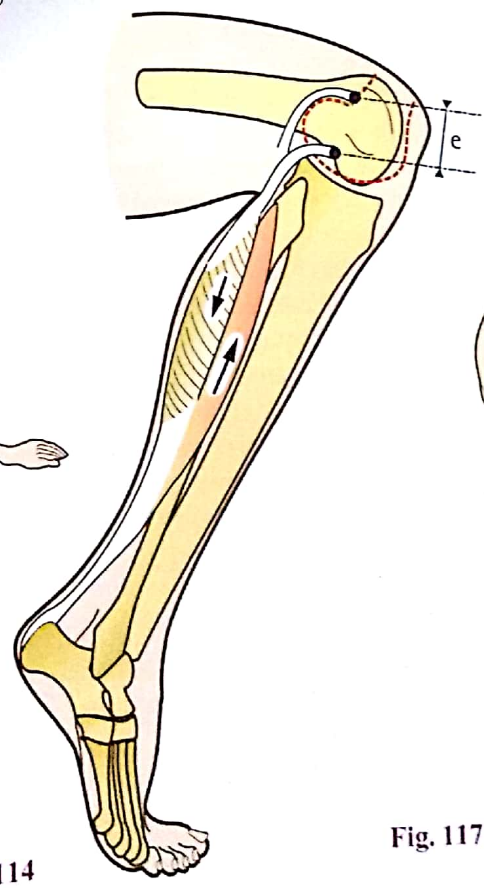


Fig. 114


Fig. 117

Le muscle triceps sural *(suite)*

L'appareil aponévrotique du muscle triceps sural est très complexe **(Fig. 120 : vue antérieure, le tibia ayant été enlevé, le muscle est donc vu par sa face profonde)** : il comporte des **processus d'origine** et des **processus de terminaison** qui forment ensuite le **tendon calcanéen**.

Il y a **trois processus d'origine** :

- les **deux** bandelettes aponévrotiques d'insertion proximale **des muscles gastrocnémiens**, l'interne **1** et l'externe **2**, occupent la partie latérale de la zone d'insertion des gastrocnémiens, au-dessus des condyles fémoraux ;
- **l'épaisse lame aponévrotique du muscle soléaire 3**, qui prend origine sur le tibia et la fibula, ces deux insertions étant séparées par l'arcade du soléaire ; la partie inférieure de cette lame est profondément échancrée « en oriflamme », avec une languette interne **4** et une languette externe **5**.

Il y a **deux processus de terminaison** :

- une **épaisse lame commune terminale 6**, parallèle à la lame du soléaire et située en avant. Elle est à l'origine du tendon calcanéen **7** se fixant sur le calcanéus **8** ;
- une **lame sagittale 9**, perpendiculaire à la précédente et à la face antérieure de laquelle elle se fixe ; la particularité de cette lame sagittale est qu'elle s'effile et remonte vers la face postérieure de la lame du soléaire, après être passée dans son échancrure.

D'arrière en avant, on trouve donc successivement **trois plans aponévrotiques** :

- celui des bandelettes des gastrocnémiens ;
- puis celui de la lame commune terminale ;
- enfin celui de la lame du soléaire ; quant à la lame sagittale, elle est « à cheval » sur le plan de cette dernière.

Les **fibres musculaires du triceps** s'organisent par rapport à ce système aponévrotique :

- les **fibres des gastrocnémiens (Fig. 121 : schéma en perspective antéro-interne, la moitié interne de la lame du soléaire a été enlevée)** : l'interne **10 (rouge)** et l'externe **11 (vert)**, partent directement de la surface en accent circonflexe supra-condylaire et de la face antérieure de chacune des bandelettes ; elles se dirigent en bas, en avant et vers l'axe de la jambe pour se fixer sur la face postérieure de la lame terminale ;
- les **fibres musculaires du soléaire (Fig. 122 : même perspective, la lame du soléaire est intacte)** se disposent en deux nappes :

– une **nappe postérieure 12**, dont les fibres **(en rouge foncé)** viennent se jeter sur la face antérieure de la lame terminale (elles ne sont figurées que du côté interne) et aussi un peu sur les faces latérales de la lame sagittale,

– une **nappe antérieure 13** dont les fibres **(en bleu foncé)** se fixent sur les deux faces de la lame sagittale.

Ce schéma montre aussi la structure spiralée et croisée **14 (fibres rouges et bleues)** du tendon calcanéen qui rend compte de son élasticité.

La **force du tendon calcanéen ou tendon d'Achille** s'applique sur l'extrémité postérieure du calcanéus **(Fig. 123)**, suivant une direction formant un angle très marqué avec son bras de levier **AO**. La décomposition de cette force **AT (vecteur vert)** montre que la composante efficace **T1 (vecteur rouge)**, perpendiculaire au bras de levier **AO**, est plus importante que la composante centripète **T2**. Le muscle travaille ainsi dans d'excellentes conditions mécaniques.

La composante efficace **T1** prédomine **T2** quel que soit le degré de flexion-extension de la cheville. Cela est dû au mode d'insertion du tendon calcanéen **(Fig. 124)**, qui s'effectue à la partie inférieure de la face postérieure du calcanéus **(point k)**, alors qu'une bourse séreuse le sépare de la partie supérieure. La force musculaire s'applique non pas au point d'insertion **k**, mais au point de tangence **a** du tendon avec la face postérieure du calcanéus. Dans la position de flexion **I (Fig. 124)**, ce point a est situé relativement haut sur la face postérieure du calcanéus. Dans la position d'extension **II (Fig. 124)**, le tendon « se déroule » et décolle de la face postérieure du calcanéus, et le point de tangence **a'** « descend » par rapport à l'os, mais la direction du bras de levier **A'O** reste toujours sensiblement horizontale, formant un *angle constant avec la direction du tendon*. Ce mode d'insertion du tendon calcanéen permet donc son « **déroulement** » sur le segment de poulie formé par la face postérieure du calcanéus et augmente l'efficacité du triceps lors de l'extension. Elle est *identique à l'insertion olécranienne du triceps brachial* (voir Volume I).

Lorsque la contraction du triceps est poussée à son maximum **(Fig. 125)**, on voit s'associer à l'extension un **mouvement d'adduction-supination** qui oriente la plante *en arrière et en dedans* **(flèche rouge Add + Sup)**. Cette composante terminale d'adduction-supination provient de ce que le triceps agit sur l'articulation talo-crurale à travers l'articulation subtalaire **(Fig. 126)**. Il mobilise donc successivement ces deux articulations **(Fig. 127)** : d'abord l'articulation talo-crurale en extension de 30° autour de l'axe transversal **XX'**, ensuite l'articulation subtalaire, faisant basculer le calcanéus autour de l'axe de Henke **mn**, ce qui entraîne une adduction **Ad** de 13° et une supination **Su** de 12° (Biesalski et Mayer, 1916).

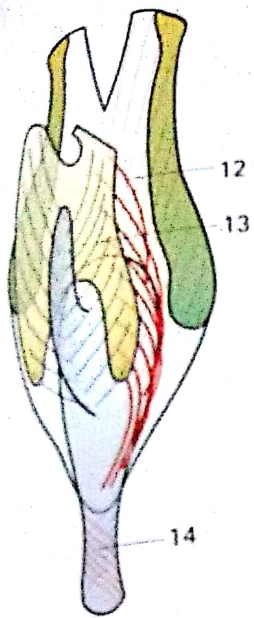


Fig. 122

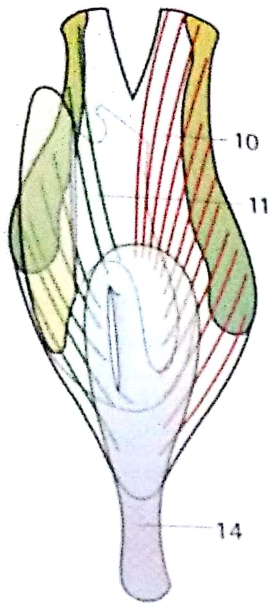


Fig. 121

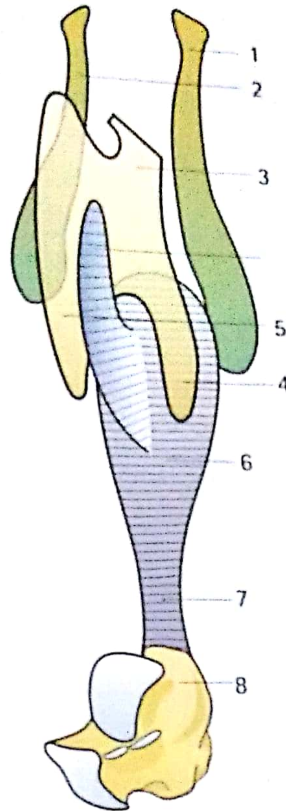


Fig. 120

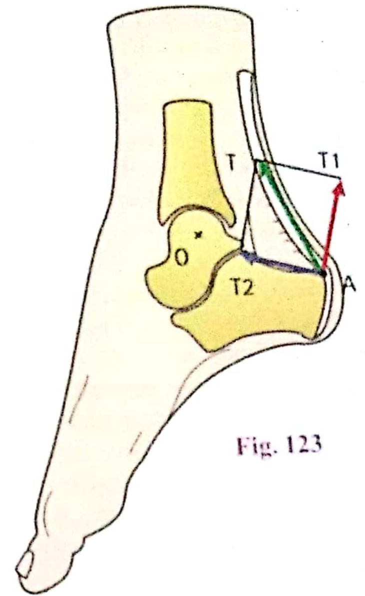


Fig. 123

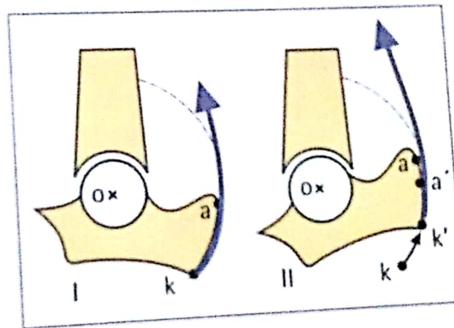


Fig. 124

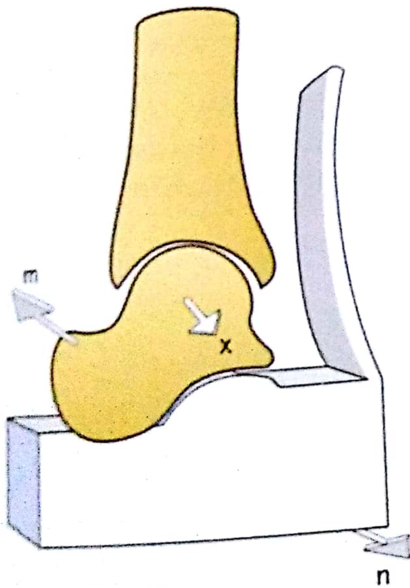


Fig. 126

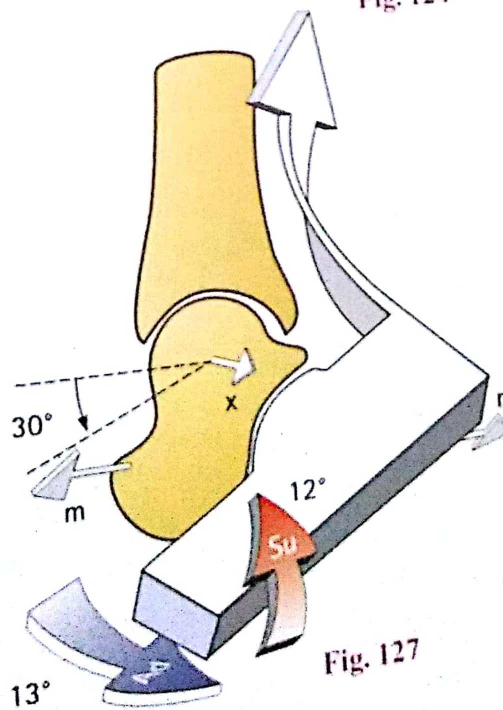


Fig. 127

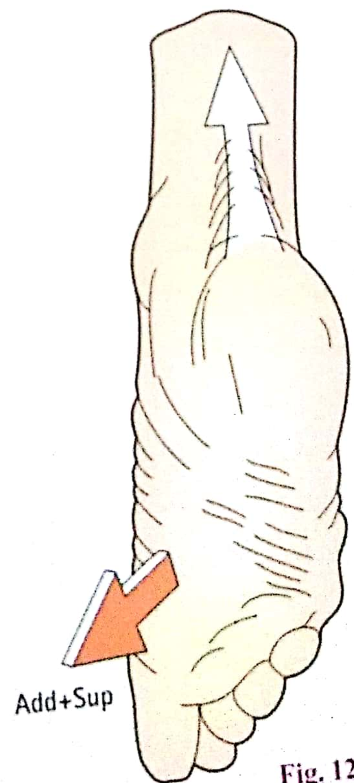


Fig. 125

Les autres extenseurs de la cheville

Tous les muscles passant en arrière de l'axe transversal **XX'** de flexion-extension **(Fig. 128)** sont **extenseurs de la cheville**. Outre le muscle triceps sural **1**, cinq autres muscles ont une action d'extension sur l'articulation talo-crurale – le muscle plantaire (non décrit ici) est trop faible pour entrer en ligne de compte : il n'a d'intérêt qu'en tant que « banque de tendon » et malheureusement il est inconstant mais cependant fréquent.

En **dehors (Fig. 129 : vue externe de la cheville)**, on trouve le **court fibulaire** 2 et le **long fibulaire** 3, situés en dehors de l'axe de Henke **UU' (Fig. 104)** et qui sont *en même temps abducteurs et pronateurs* (voir page suivante).

En **dedans (Fig. 130 : vue interne de la cheville)**, on trouve :

- le **tibial postérieur** 4 ;
- le **long fléchisseur des orteils** 5 ;
- le **long fléchisseur de l'hallux** 6.

Ils sont situés en dedans de l'axe **UU' (Fig. 104)** et sont *en même temps adducteurs et supinateurs*.

L'extension pure est donc la résultante de l'**action synergique-antagoniste** des muscles des deux groupes, le groupe externe et le groupe interne.

Cependant, l'action d'extension de ces muscles, qu'on pourrait appeler « extenseurs accessoires », est bien modeste en regard de celle du muscle triceps sural **(Fig. 131 : diagramme de puissance des extenseurs)**.

En effet, la **puissance du triceps**, de 6,5 kgm (plateau de gauche), qui additionne celle du muscle soléaire **Sol** et celle des muscles gastrocnémiens **Jx**, est considérable comparée à celle des autres extenseurs (plateau de droite), qui n'est que de 0,5 kgm, soit le *quatorzième de la puissance totale d'extension*.

Comme on sait que la puissance d'un muscle est proportionnelle à sa surface de section physiologique et à sa course, on peut la schématiser par un volume dont la base est la surface de section et la hauteur la course. Le soléaire **Sol**, dont la section est de 20,2 cm et la course de 44 mm, a une puissance légèrement inférieure (880) à celle des deux gastrocnémiens (897) **Gas** dont la section globale est de 23 cm² et la course de 39 mm.

D'autre part, la puissance des muscles fibulaires **Fib** : long fibulaire **LF (volume vert)** et court fibulaire **CF (volume orange)** représente la moitié de la puissance globale des extenseurs accessoires, représentés globalement par le volume bleu **AE**.

Le muscle long fibulaire est lui-même deux fois plus puissant que le court fibulaire.

Les muscles extenseurs accessoires, lorsque le tendon calcanéen est rompu, peuvent donc *étendre activement la cheville, le pied étant libre*, sans appui, mais ils sont incapables de soulever le corps sur la pointe du pied, ce que seul le triceps est capable de faire. La perte de l'élévation active sur la pointe du pied – position dite « du Génie de la Bastille » (Statue située au sommet de la colonne de Juillet, sur la place de la Bastille à Paris.) – est donc le **test de la rupture du tendon calcanéen**.

Fig. 128

Fig. 129

Fig. 130

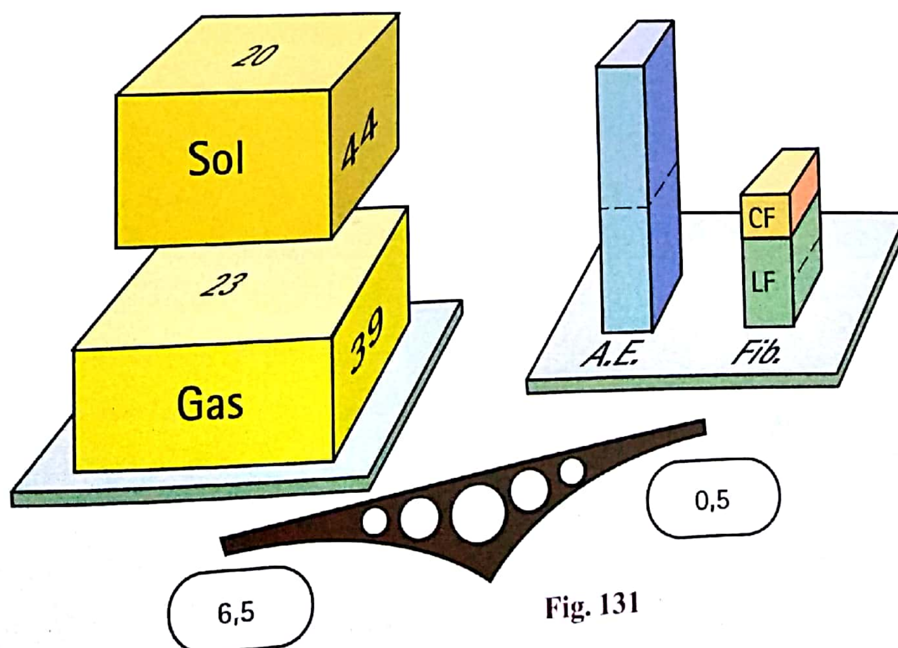


Fig. 131

Les muscles abducteurs-pronateurs : les muscles fibulaires

Les **muscles fibulaires**, passant en arrière de l'axe transversal **XX'** et en dehors de l'axe de Henke **UU'**, sont simultanément **(Fig. 132)** :

- extenseurs **(flèche bleue)** ;
- abducteurs **(flèche rouge)**, déviant en dehors l'axe **ZZ'** ;
- pronateurs **(flèche jaune)**, orientant vers le dehors le plan général de la plante, matérialisé par un plan orange.

Le **muscle court fibulaire 1**, qui se fixe **(Fig. 133)** sur le styloïde du cinquième métatarsien, est essentiellement abducteur du pied : pour Duchenne de Boulogne, c'est même le seul muscle abducteur direct (voir aussi Fig. 100, p. 219). Il est, en tout cas, plus abducteur que le muscle long fibulaire. Il participe **(Fig. 134)** à la **pronation (flèche rouge)** de l'avant-pied en élevant les rayons métatarsiens externes **(flèche verte)**. Dans cette action, il est aidé par le **troisième fibulaire 3** et le long extenseur des orteils (non figuré) qui sont aussi abducteurs-pronateurs, mais en même temps fléchisseurs de la cheville. L'**abduction-pronation pure** résulte donc de l'action synergique-antagoniste des trois fibulaires d'une part et du long extenseur des orteils d'autre part.

Le **muscle long fibulaire 2 (Fig. 133 et 135)** joue un rôle fondamental à la fois dans les mouvements du pied et dans la statique et la dynamique de la voûte plantaire :

- il est **abducteur**, comme le muscle court fibulaire, et sa contracture déjette l'avant-pied en dehors **(Fig. 137)**, en baïonnette, tandis que la malléole médiale fait saillie ;
- il est **extenseur** de manière directe et indirecte :
  – directement, il abaisse **(Fig. 134 : flèche bleue et Fig. 135 : flèche verte)** la tête du premier métatarsien ;
  – indirectement surtout : en attirant le premier métatarsien en dehors **(flèche bleue, Fig. 135)**, il solidarise les métatarsiens internes avec les externes **(Fig. 136)**. Or, le **triceps 4** n'étend directement que les métatarsiens externes (schématisés sous forme d'une poutre). En réalisant l'« **embrayage** » des métatarsiens internes sur les externes **(flèche rouge)**, le muscle long fibulaire permet à la force du triceps de se répartir sur tous les rayons du pied. Cela est confirmé par les paralysies du muscle long fibulaire où seule l'arche externe est étendue par le triceps : le pied tourne alors en **supination**. L'**extension pure du pied** est donc le résultat de la **contraction synergique-antagoniste** du triceps et du long fibulaire : synergique dans l'extension, antagoniste dans la prono-supination ;
- il est, en effet, **pronateur (Fig. 134)** en abaissant **(flèche bleue)** la tête du premier métatarsien lorsque l'avant-pied n'est pas en appui sur le sol. La pronation **(flèche rouge)** résulte de l'élévation de l'arche externe **(flèche verte)** associée à l'abaissement de l'arche interne **(flèche bleue)**.

Nous verrons aussi (p. 240) comment le muscle long fibulaire exagère la courbure des trois arches de la voûte plantaire et constitue son **principal soutien musculaire**.

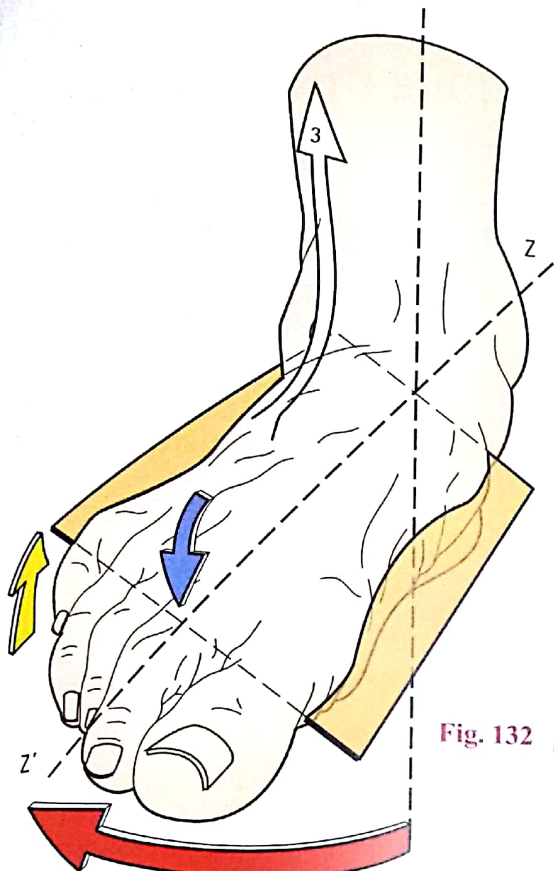


Fig. 132

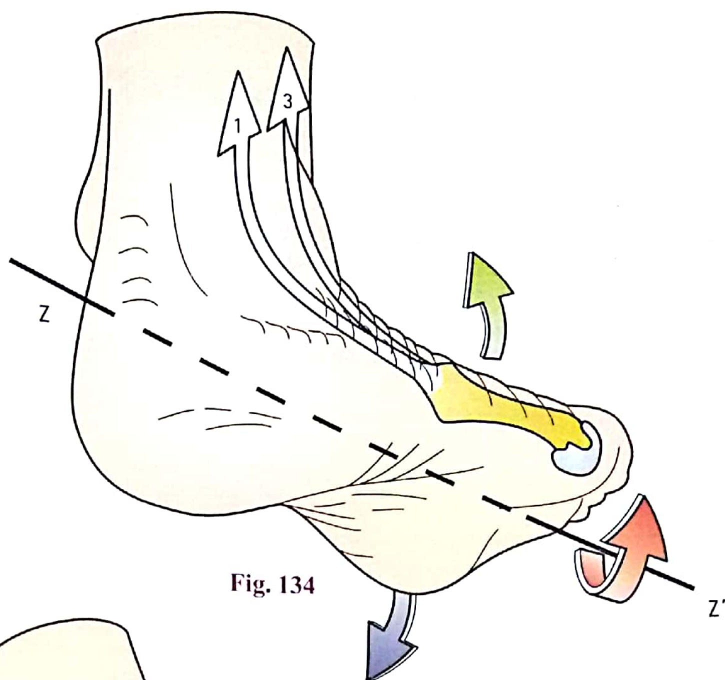


Fig. 134

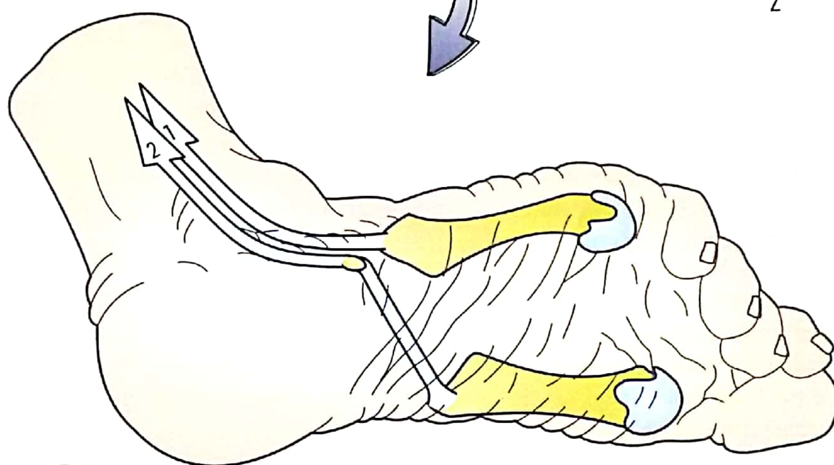


Fig. 133

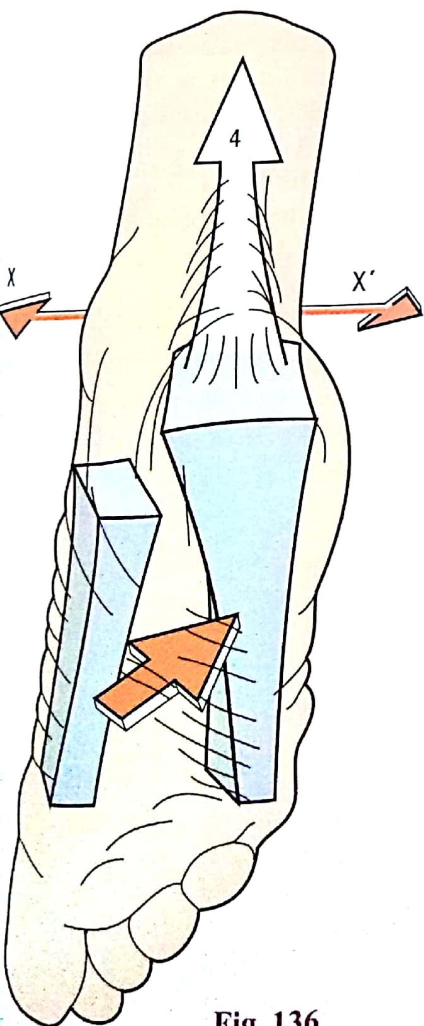
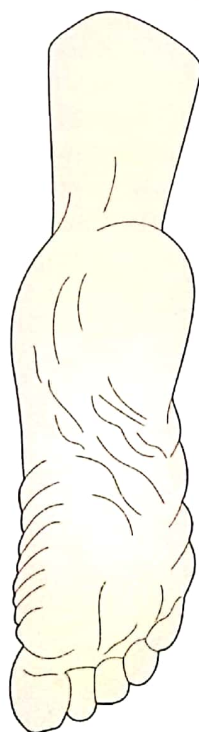
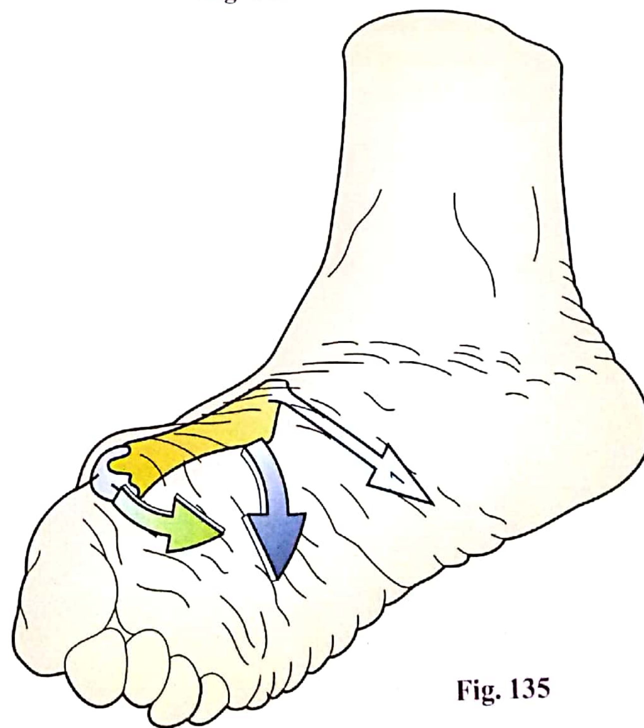


Fig. 136


Fig. 137


Fig. 135

Les muscles adducteurs-supinateurs : les muscles tibiaux

Les **trois muscles rétromalléolaires internes**, situés en arrière de l'axe **XX'** et en dedans de l'axe **UU' (voir Fig. 104, p. 221)** sont simultanément **(Fig. 138)** :

- extenseurs **(flèche bleue)** ;
- adducteurs **(flèche verte)**, déviant en dedans l'axe longitudinal du pied ;
- supinateurs **(flèche jaune)**, orientant vers le dedans le plan général de la plante.

Le **muscle tibial postérieur 1**, le plus important des trois, se fixe **(Fig. 139)** sur le tubercule du scaphoïde **(jaune)**. Croisant les articulations talo-crurale, subtalaire et transverse du tarse, il agit simultanément sur ces trois articulations :

- en attirant le scaphoïde en dedans **(Fig. 140)**, il est très fortement **adducteur** et entraîne la rotation de tout le tarse postérieur. Pour Duchenne de Boulogne, il est plus adducteur que supinateur). Il est ainsi directement antagoniste du muscle court fibulaire **2**, qui attire le tarse antérieur en dehors **(Fig. 141)** par l'intermédiaire du cinquième métatarsien, et entraîne la rotation inverse du tarse postérieur ;
- il est **supinateur**, grâce à ses expansions plantaires sur les os du tarse et du métatarse (voir Fig. 100 p. 219). Il joue un rôle essentiel dans le soutien et l'orientation de la voûte plantaire. On a pu incriminer l'absence congénitale de ces expansions du muscle tibial postérieur dans le déterminisme du pied plat valgus. L'amplitude de supination de 52° se répartit pour 34° dans l'articulation subtalaire et pour 18° dans l'articulation transverse du tarse (Biesalski et Mayer) ;
- il est **extenseur (Fig. 142)** non seulement de l'articulation talo-crurale **(flèche verte)**, mais encore de l'articulation transverse du tarse **(flèche rouge)** par abaissement du scaphoïde : le mouvement de l'avant-pied prolonge celui de la cheville (voir p. 161, Fig. 5).

Dans ses actions d'extension et d'adduction, le muscle tibial postérieur est aidé par le muscle long fléchisseur de l'hallux et le muscle long fléchisseur des orteils.

Le muscle tibial antérieur et le muscle long extenseur de l'hallux **(Fig. 142 : seul le muscle tibial antérieur a été figuré)** passent en avant de l'axe transversal **XX'** et en dedans de l'axe de Henke **UU' (Fig. 104)**. Ils sont donc **fléchisseurs de la cheville** et en **même temps adducteurs et supinateurs**.

Le **muscle tibial antérieur** 3 **(Fig. 138)** est **plus supinateur qu'adducteur**. Il agit en élevant tous les éléments de l'arche interne **(Fig. 142)** :

- il élève la base du premier métatarsien sur le premier cunéiforme **(flèche a)**, donc la tête du premier métatarsien s'élève ;
- il élève le cunéiforme sur le scaphoïde **(flèche b)** et le scaphoïde sur le talus **(flèche c)** avant de fléchir l'articulation talo-crurale **(flèche d)** ;
- aplatissant l'arche interne en entraînant la **supination**, il est l'antagoniste direct du muscle long fibulaire ;
- son action d'**adduction** est plus modérée que celle du muscle tibial postérieur ;
- il est **fléchisseur de la cheville** et sa contraction synergique antagoniste avec le muscle tibial postérieur entraîne une adduction-supination pure sans flexion ni extension ;
- sa **contracture** entraîne un pied talus varus avec flexion des orteils **(Fig. 144)** surtout de l'hallux.

Le **muscle long extenseur de l'hallux 4 (Fig. 143)** est plus faiblement adducteur-supinateur que le muscle tibial antérieur. Il peut le suppléer dans la flexion de la cheville, mais il existe alors souvent une griffe de l'hallux.

La puissance des supinateurs (2,82 kgm) dépasse celle des pronateurs (1,16 kgm) : hors appui au sol, le pied tourne spontanément en supination. Ce déséquilibre compense par avance la tendance naturelle du pied à l'appui à tourner en pronation (voir p. 242) lorsque le poids du corps l'applique sur le sol.

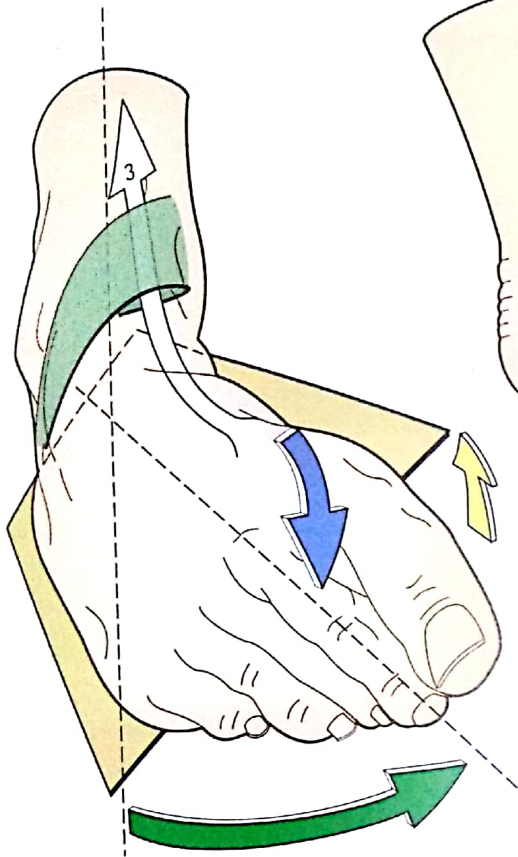


Fig. 138



Fig. 144

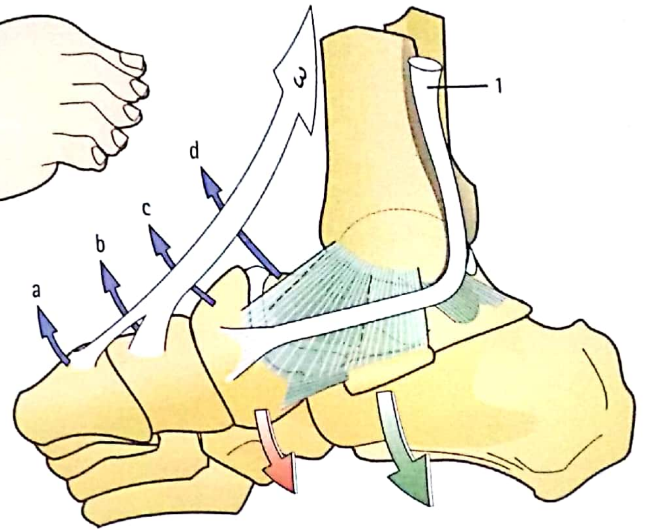


Fig. 142

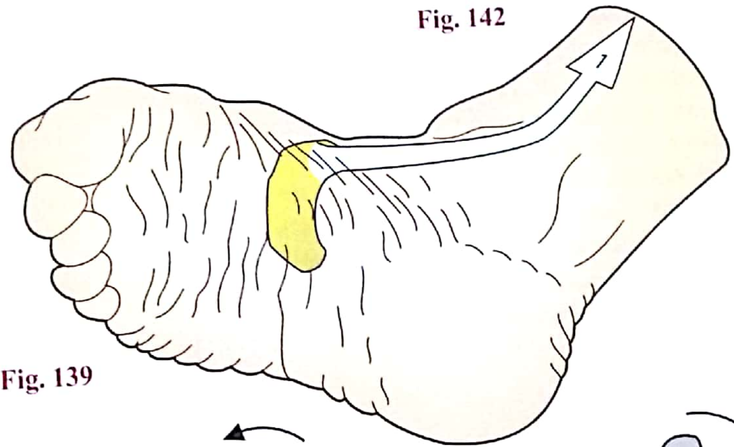


Fig. 139

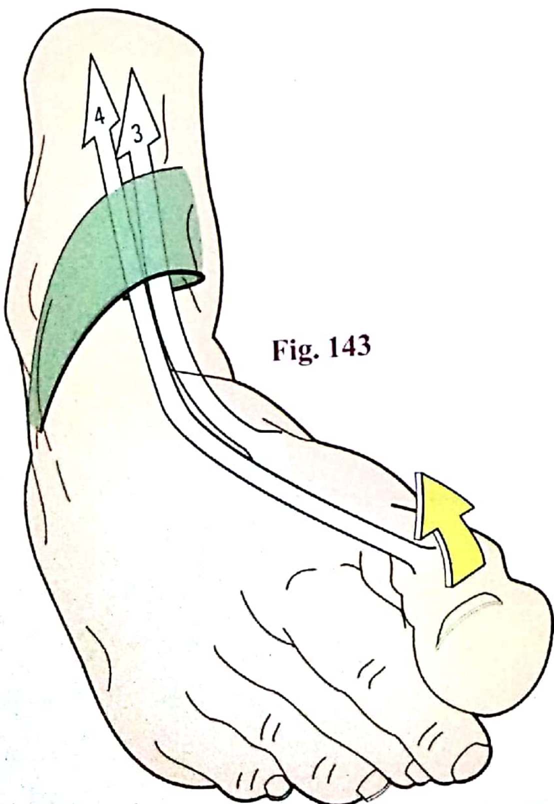


Fig. 143

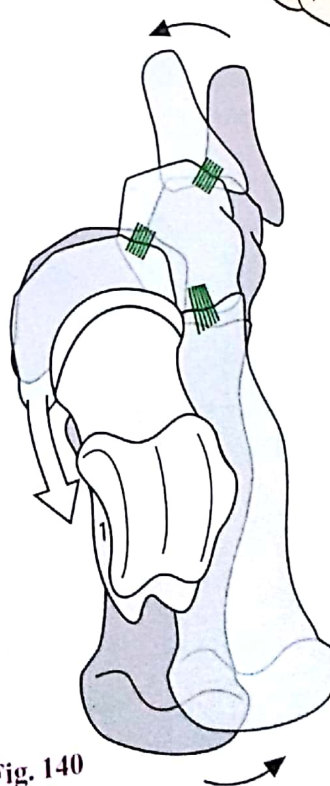


Fig. 140

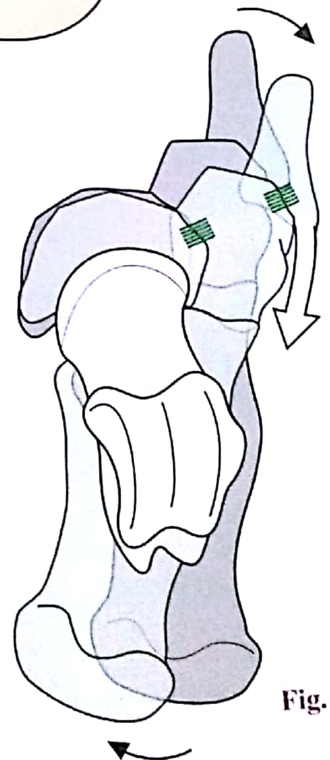


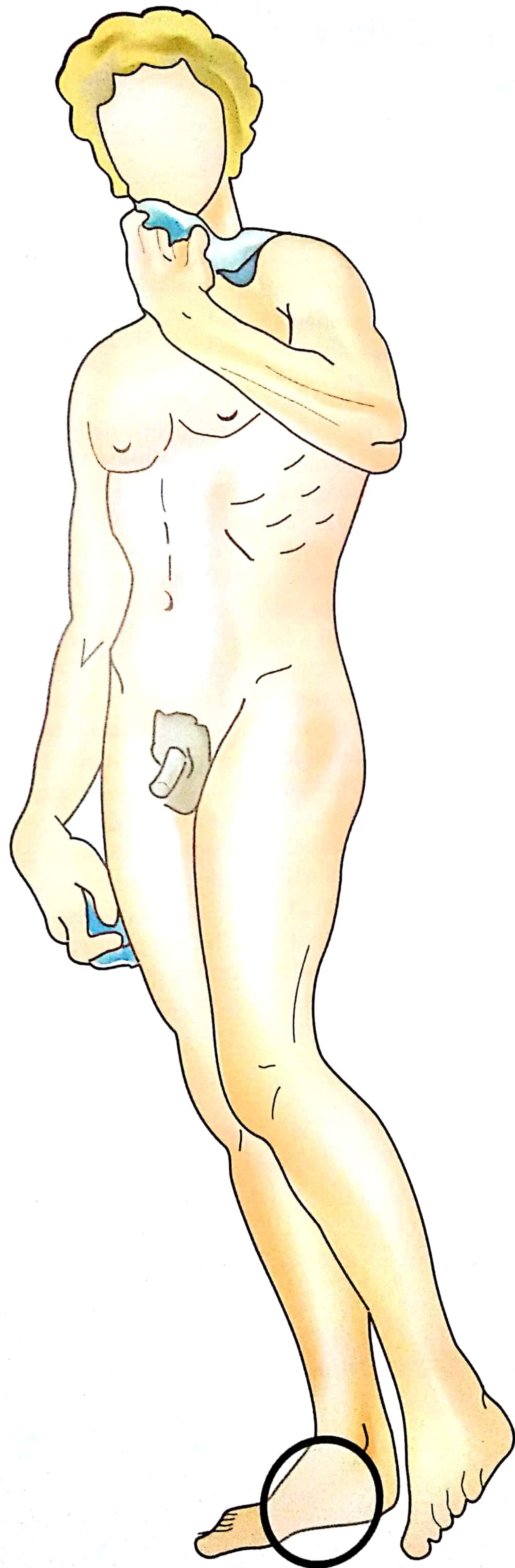
Fig. 141

Chapitre 5

LA VOÛTE PLANTAIRE

La voûte plantaire est un **ensemble architectural** associant harmonieusement tous les éléments ostéo-articulaires, ligamentaires et musculaires du pied.
C'est l'équivalent, au pied, de la paume à la main, mais au cours de l'évolution, son adaptation lui à permis d'assumer une nouvelle fonction : dans le cadre de la bipédie, la voûte plantaire **la meilleure transmission possible du poids du corps** vers le sol, malgré toutes ses inégalités, lors de la station debout, de la marche, de la course et du saut, au détriment de la fonction de grimper aux arbres, tellement nécessaire à nos cousins les singes, qui peuvent être quadrumanes.

Grâce à ses changements de courbure et à son élasticité, la voûte plantaire peut s'adapter à toutes les inégalités du terrain et, en toutes circonstances, transmettre au sol les efforts et les contraintes dûs à notre *pesanteur terrestre* (on peut se poser la question de la manière dont aurait évolué la plante du pied dans la pesanteur de la Lune ou de Jupiter ?) dans les meilleures conditions mécaniques. Elle joue le rôle d'un **amortisseur indispensable à la souplesse de la démarche**. Les troubles qui peuvent l'affecter, en exagérant ou en diminuant ses courbures, retentissent gravement sur l'appui au sol et obligatoirement sur la marche, la course, le saut et la simple station debout.



La voûte plantaire dans son ensemble

Considérée dans son ensemble, l'architecture de la plante du pied peut être définie comme une **voûte soutenue par trois arches**. Une telle voûte a été réalisée par les architectes et les ingénieurs **(Fig. 1 : pavillon du CNIT à la Défense, à Paris)** : elle repose sur le sol par **trois points A, B** et **C**, qui sont disposés en plan **(Fig. 2)** aux sommets d'un *triangle équilatéral*. Entre deux appuis consécutifs **AB**, **BC** ou **CA** est tendue une arche qui *borde latéralement la voûte*. Le poids de la voûte s'applique **(Fig. 3 : voûte classique)** sur la **clé de voûte (flèche)** et se répartit à travers les deux arcs-boutants vers les points d'appui **A** et **B**, encore appelés « culées de l'arche »

Certains auteurs après Lapidus, comme De Doncker et Kowalski, critiquent la conception de voûte, qu'ils considèrent trop statique, et pensent, sans doute avec quelques justifications, que les arches externes et antérieures ne sont que des constructions de l'esprit. Ils préfèrent comparer le pied à une « ferme » **(Fig. 4 : « ferme » de toiture)**, partie de charpente comportant **deux arbalétriers SA** et **SB**, articulés ensemble au niveau du **faîte S**, et maintenus à la base par un **entrait AB** qui, par traction, empêche l'écrasement du triangle sous la charge s'appliquant au faîte. Le pied ne comporterait alors qu'*une seule ferme axiale* avec un *entrait principal* formé essentiellement des puissants ligaments plantaires et de muscles plantaires et *deux entraits latéraux secondaires*, au niveau de ce qu'on appelait jusqu'alors les arches externe et interne.

Cette conception correspond certainement mieux à la réalité anatomique, en ce qui concerne en particulier les éléments ligamentaires et musculaires, formant les cordes des arches et qui travaillent en élongation, et qu'on peut effectivement aussi comparer à des entraits. Cependant, les termes de voûte et d'arches sont tellement imagés et passés dans le langage qu'il semble préférable de continuer à les utiliser, parallèlement à ceux de ferme et d'entraits. Comme bien souvent en biomécanique, *deux notions qui semblent à première vue contradictoires ne s'excluent pas et participent à une conception synthétique*. Nous continuerons donc à parler de voûte plantaire et d'arches.

La **voûte plantaire (Fig. 5 : vue interne, en transparence)** ne réalise pas un triangle équilatéral, mais, possédant **trois arches** et **trois points d'appui**, sa structure est comparable, mais asymétrique : ses points d'appui **(Fig. 6 : le pied, vu d'en haut, est supposé transparent)** sont compris dans la zone de contact avec le sol, ou **empreinte plantaire (zone verte)**. Ils correspondent à la tête du premier métatarsien **A**, à la tête du cinquième métatarsien **B** et aux processus du calcanéus **C**. Chaque point d'appui est commun aux deux arches contiguës.

Entre les deux **points d'appui antérieurs A** et **B** est tendue l'**arche antérieure**, la plus courte et la plus basse. Entre les deux **points d'appui externes B** et **C** se situe l'**arche externe**, de longueur et de hauteur intermédiaires. Enfin, entre les **deux points d'appui internes C** et **A** s'étend l'**arche interne**, la plus longue et la plus haute. C'est la plus importante des trois, tant sur le plan statique que dynamique.

La forme de la voûte plantaire **(Fig. 5 : partie inférieure)** s'apparente ainsi à celle d'une voile, d'un *foc gonflé par le vent*. Son sommet est nettement déporté vers l'arrière et le poids du corps **(flèche verte)** s'applique sur son versant postérieur **(flèche rouge)** en un point **(croix noire de la figure 6)** situé au **centre du cou-de-pied**.

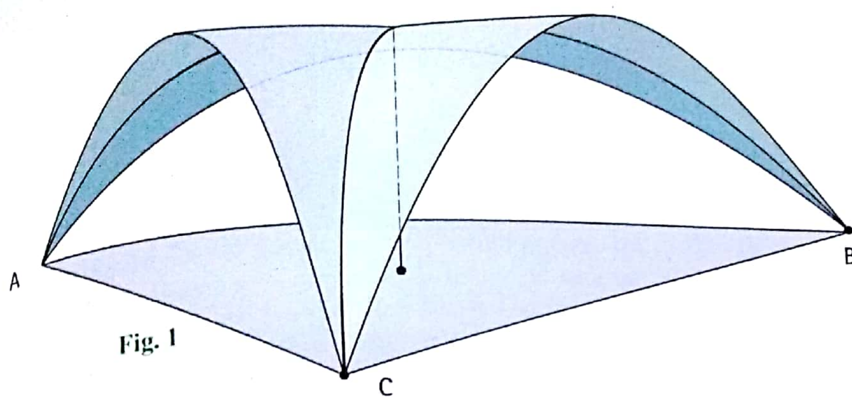


Fig. 1

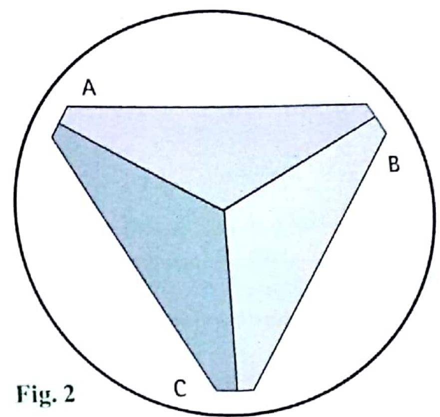


Fig. 2

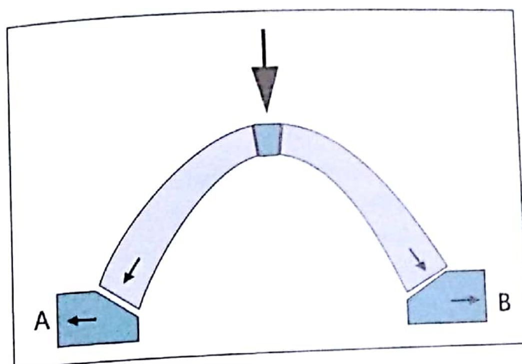


Fig. 3

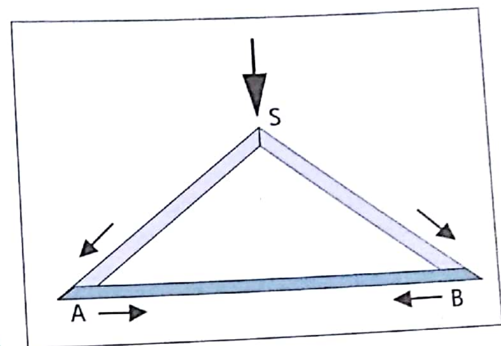


Fig. 4

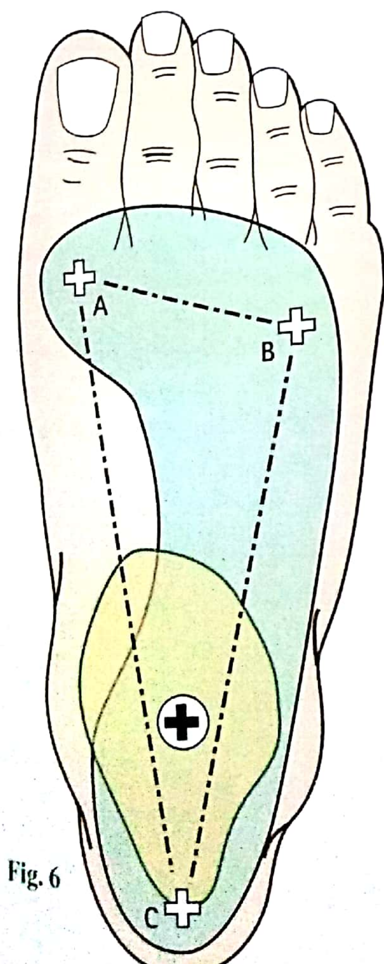


Fig. 6

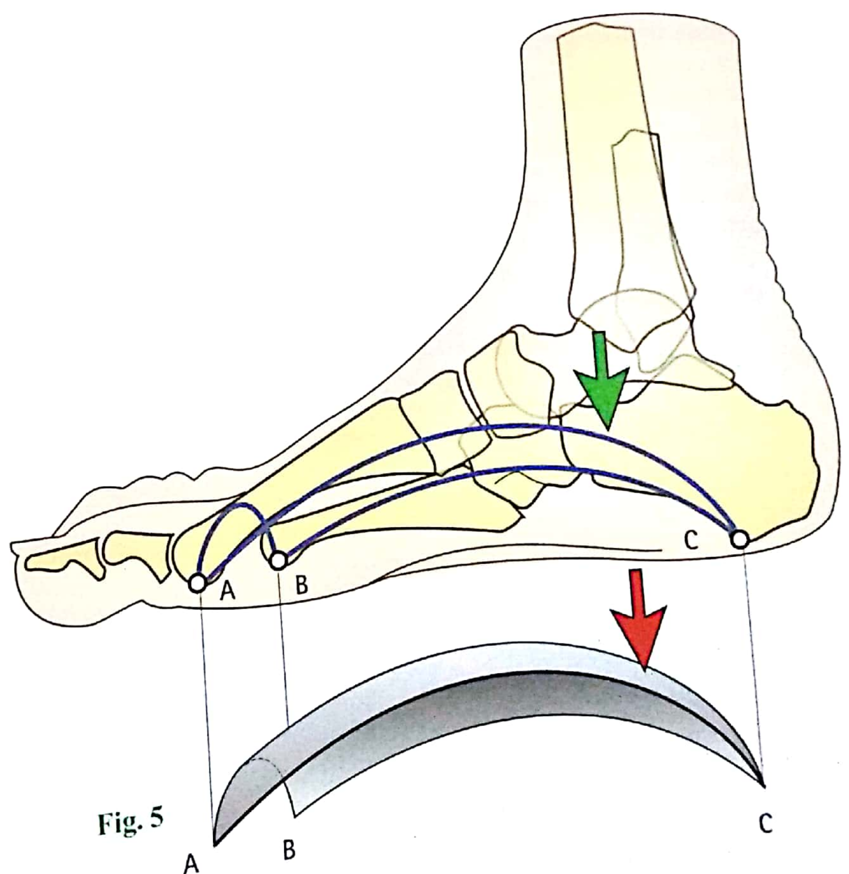


Fig. 5

L'arche interne

Entre ses deux points d'appui antérieur **A** et postérieur **C**, l'arche interne **(Fig. 7)** comprend **cinq pièces osseuses**, qui sont, d'avant en arrière :

- le **premier métatarsien M1**, qui repose sur le sol par sa tête ;
- le **premier cunéiforme C1**, entièrement suspendu ;
- le **scaphoïde S**, clé de voûte de cette arche, figurée par le trapèze bleu, situé 15-18 mm au-dessus du sol ;
- le **talus Tal**, qui reçoit les efforts transmis par la jambe et les répartit (voir Fig. 15, p. 187) sur la voûte ;
- le **calcanéus Cal** qui ne repose sur le sol que par son extrémité postérieure.

La **transmission des efforts mécaniques** se lit **(Fig. 8)** dans la disposition des travées osseuses :

- les travées issues de la corticale antérieure du tibia parcourent, obliques en bas et en arrière, *l'arc-boutant postérieur*, traversant le corps du talus pour s'épanouir dans l'éventail subthalamique vers la culée postérieure de l'arche, le point de contact au sol du calcanéus ;
- les travées issues de la corticale postérieure du tibia s'orientent en bas et en avant dans le col et la tête du talus pour se poursuivre dans le scaphoïde et l'arc-boutant antérieur, constitué par le cunéiforme et le métatarsien.

L'arche interne ne conserve sa **concavité** que grâce aux ligaments et aux muscles **(Fig. 7)**.

De nombreux **ligaments plantaires** réunissent les cinq pièces osseuses ; ce sont les ligaments cunéo-métatarsien, scapho-cunéen, mais surtout le **ligament calcanéo-scaphoïdien inférieur 1** et le **ligament talo-calcanéen 2**. Ils résistent aux efforts violents, mais de courte durée, à l'inverse des muscles qui s'opposent aux déformations prolongées.

Les **muscles**, joignant deux points plus ou moins éloignés de l'arche, forment des cordes partielles ou totales. Ils agissent comme de véritables **tendeurs**.

- Le **muscle tibial postérieur 4** forme une *corde partielle* **(Fig. 10)** tendue près du sommet de l'arche, mais son rôle est essentiel. En effet **(Fig. 9)**, son fort tendon **(flèche rouge)** ramène le scaphoïde **S** en bas et en arrière, sous la tête du talus **Tal** en suivant le cercle en tirets : à un raccourcissement relativement faible **e** du tendon correspond un **changement d'orientation du scaphoïde** qui entraîne un abaissement de l'arc-boutant antérieur. De plus, les expansions plantaires de son tendon **3 (Fig. 7)** se tissent avec les ligaments plantaires et agissent sur les trois métatarsiens médians.
- Le **muscle long fibulaire 5** agit aussi sur l'arche interne dont il augmente la concavité **(Fig. 11)** en fléchissant le premier métatarsien **M1** sur le premier cunéiforme **C1**, et celui-ci sur le scaphoïde **S (Fig. 9)** (voir aussi son action sur la courbure transversale, p. 241).
- Le **muscle long fléchisseur de l'hallux 6** forme une *corde subtotale* **(Fig. 12)** de l'arche interne ; il agit donc puissamment sur sa concavité, aidé par le **muscle long fléchisseur des orteils 7** qui le sous-croise **(Fig. 13)**. Le muscle long fléchisseur de l'hallux joue aussi le rôle de *stabilisateur du talus* et du calcanéus : en passant entre ses deux tubercules postérieurs, il s'oppose **(Fig. 14)** au recul du talus **(flèche blanche)**. Sous la poussée du scaphoïde **(flèche blanche)**, le ligament interosseux **2** se tend d'abord et le talus est repoussé vers l'avant par le tendon qui le propulse *comme la corde d'un arc pousse la flèche*. Passant sous la console du sustentaculum tali **(Fig. 15)**, le tendon du muscle long fléchisseur de l'hallux, par le même mécanisme de la corde de l'arc, *relève l'extrémité antérieure du calcanéus* **(flèche noire)** qui reçoit la poussée verticale **(flèche blanche)** de la tête du talus.
- Le **muscle abducteur de l'hallux 8** forme la *corde totale* de l'arche interne **(Fig. 16)**. C'est donc un tendeur particulièrement efficace : il augmente la concavité de l'arche interne en rapprochant ses deux extrémités.

Par contre **(Fig. 17)**, insérés sur la convexité de l'arche, le muscle long extenseur de l'hallux **9** – dans certaines conditions – et le muscle tibial antérieur **10** diminuent sa courbure et l'aplatissent.

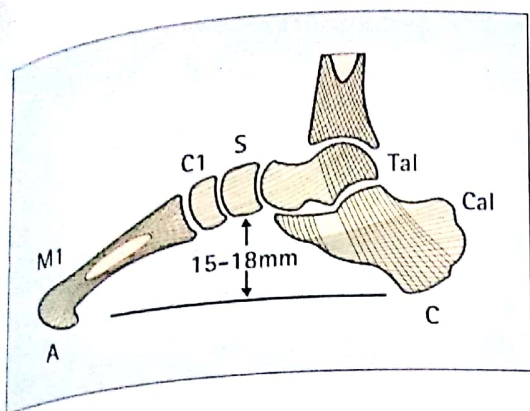


Fig. 8

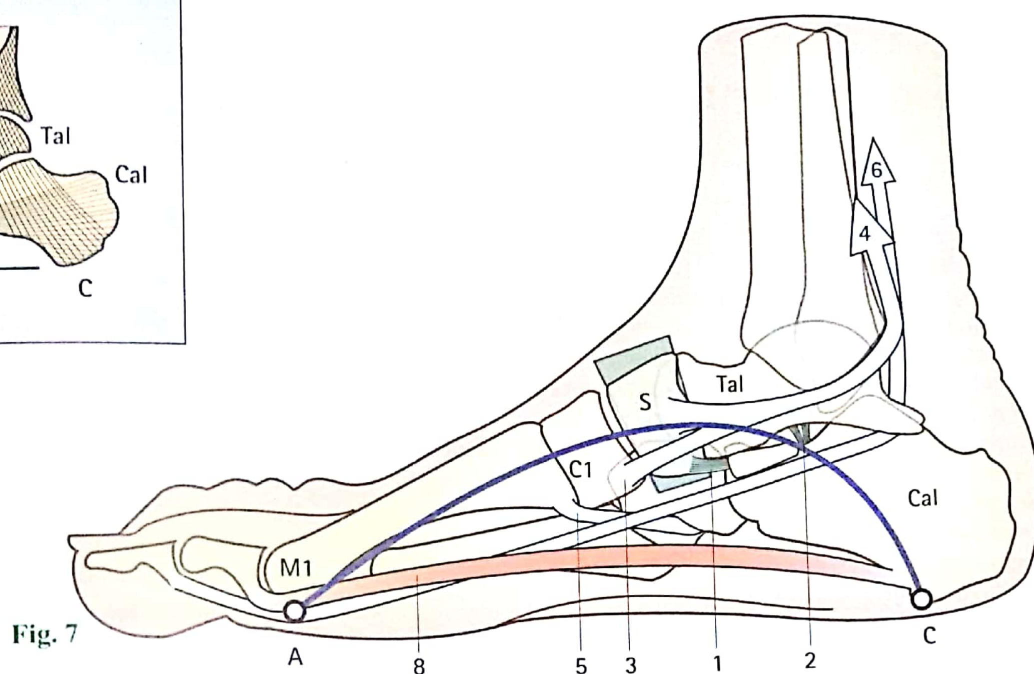


Fig. 7

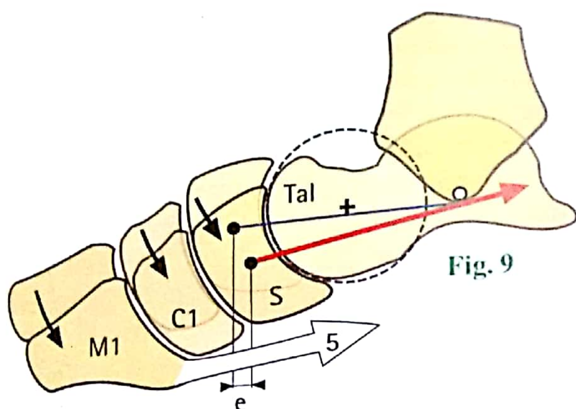


Fig. 9

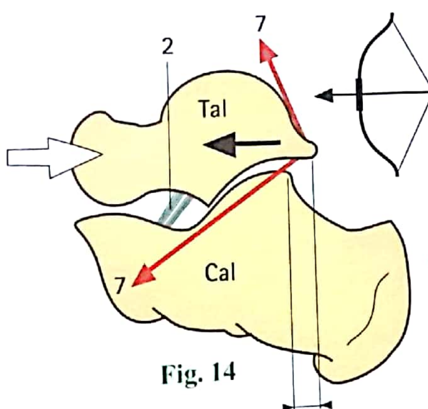


Fig. 14

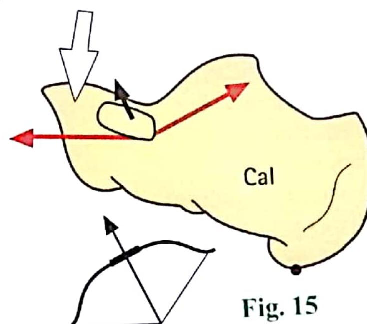


Fig. 15

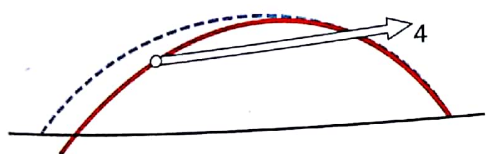


Fig. 10

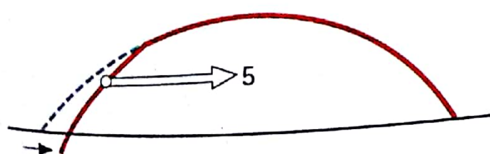


Fig. 11

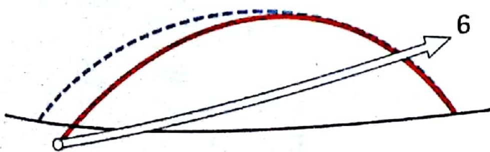


Fig. 12

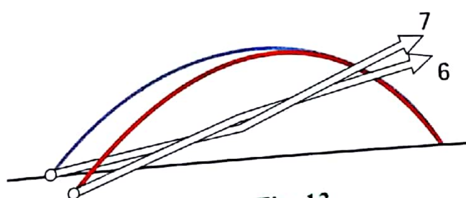


Fig. 13

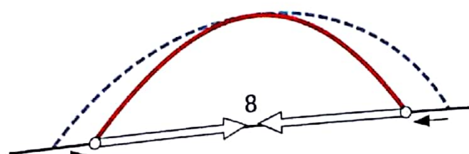


Fig. 16

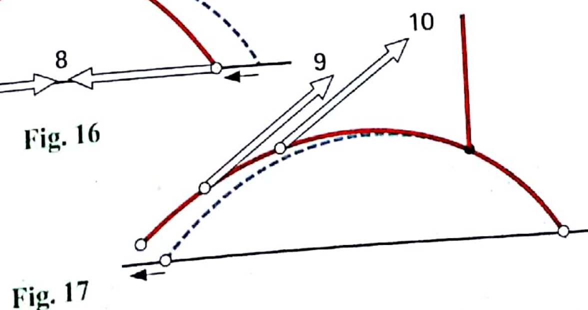


Fig. 17

L'arche externe

L'arche externe ne comprend que **trois pièces osseuses (Fig. 18 : vue de profil de l'arche externe)** :

- le **cinquième métatarsien M5**, dont la tête constitue le point d'appui antérieur **B** de l'arche externe ;
- le **cuboïde Cub**, entièrement suspendu au-dessus du sol ;
- le **calcanéus Cal**, dont les processus postérieurs constituent le point d'appui postérieur **C** de l'arche.

Cette arche, à la différence de l'arche interne, qui surplombe le sol, est *peu élevée* (3-5 mm) et *prend contact avec le sol par l'intermédiaire des parties molles*.

La **transmission des efforts mécaniques (Fig. 19)** s'effectue à travers le talus, posé lui-même sur le calcanéus, par l'intermédiaire de deux systèmes trabéculaires :

- issues de la corticale antérieure du tibia, les **travées postérieures** s'épanouissent dans l'éventail subthalamique ;
- partant de la corticale postérieure du tibia, les **travées antérieures** traversent d'abord le talus dont la tête repose en partie sur le grand processus du calcanéus, puis par le cuboïde gagnent le cinquième métatarsien et l'appui antérieur.

Outre l'éventail subthalamique, le calcanéus comporte **deux systèmes trabéculaires principaux** :

- un **système arciforme supérieur**, concave vers le bas, qui se condense en une lame compacte dans le plancher du sinus du tarse : ses fibres travaillent *en compression* ;
- un **système arciforme inférieur**, concave vers le haut, qui se condense sur la corticale inférieure de l'os et travaille *en élongation*.

Entre ces deux systèmes se trouve un **point faible**, marqué par une croix (+).

Alors que l'arche interne est tout en souplesse grâce à la mobilité du talus sur le calcanéus, l'arche externe est beaucoup plus rigide afin de **transmettre l'impulsion motrice du triceps** (Fig. 127, p. 225). Elle doit cette rigidité à la puissance du **grand ligament calcanéo-cuboïdo-métatarsien plantaire** dont les faisceaux profond **4** et superficiel **5** empêchent le bâillement inférieur des articulations calcanéo-cuboïdienne et cuboïdo-métatarsienne **(Fig. 20)** sous le poids du corps **(flèche blanche)**.

La clé de voûte de l'arche est constituée par le grand processus du calcanéum **D** où viennent s'opposer les efforts de l'arc-boutant postérieur **CD** et de l'arc-boutant antérieur **BD**. Lorsqu'un effort trop violent s'applique verticalement sur l'arche, par l'intermédiaire du talus – chute sur les pieds d'un lieu élevé – il s'ensuit deux conséquences **(Fig. 21)** :

- le ligament calcanéo-cuboïdien plantaire résiste, mais l'arche se rompt au niveau de sa clé de voûte et **le grand processus est fracturé** par un trait vertical passant par le point faible ;
- le **thalamus est enfoncé** dans le corps du calcanéus et l'angle de Bœhler **PTD** normalement obtus **(Fig. 20)** vers le bas est annulé ou même inversé en **PT'D** ;
- du côté interne, le petit processus est souvent détaché par un trait sagittal (non figuré ici).

De telles fractures du calcanéus sont très difficiles à réduire, car il faut non seulement relever le thalamus, mais encore redresser le grand processus, faute de quoi l'arche interne reste effondrée.

Trois muscles forment les **tendeurs actifs** de cette arche :

- le **muscle court fibulaire 1**, qui est une *corde partielle* **(Fig. 22)** de l'arche mais qui, comme le ligament calcanéo-cuboïdien, empêche le bâillement inférieur **e** des articulations **(Fig. 23)** ;
- le **muscle long fibulaire 2**, qui suit jusqu'au cuboïde un trajet parallèle au précédent et joue le même rôle ; mais de plus **(Fig. 24 : calcanéus suspendu)**, il est accroché sur le calcanéus par le tubercule des fibulaires **6** et soutient élastiquement son extrémité antérieure à la manière du muscle fléchisseur propre de l'hallux du côté interne, comme la corde d'un arc ;
- le **muscle abducteur du cinquième orteil 3**, qui forme la corde totale de l'arche externe **(Fig. 25)** comme son pendant, le muscle abducteur de l'hallux : il a une action analogue.

Agissant *sur la convexité de l'arche externe* **(Fig. 26)**, le muscle troisième fibulaire **7** et le muscle long extenseur des orteils **8** – dans certaines conditions – diminuent sa courbure. Il en est de même pour le muscle triceps **9**.

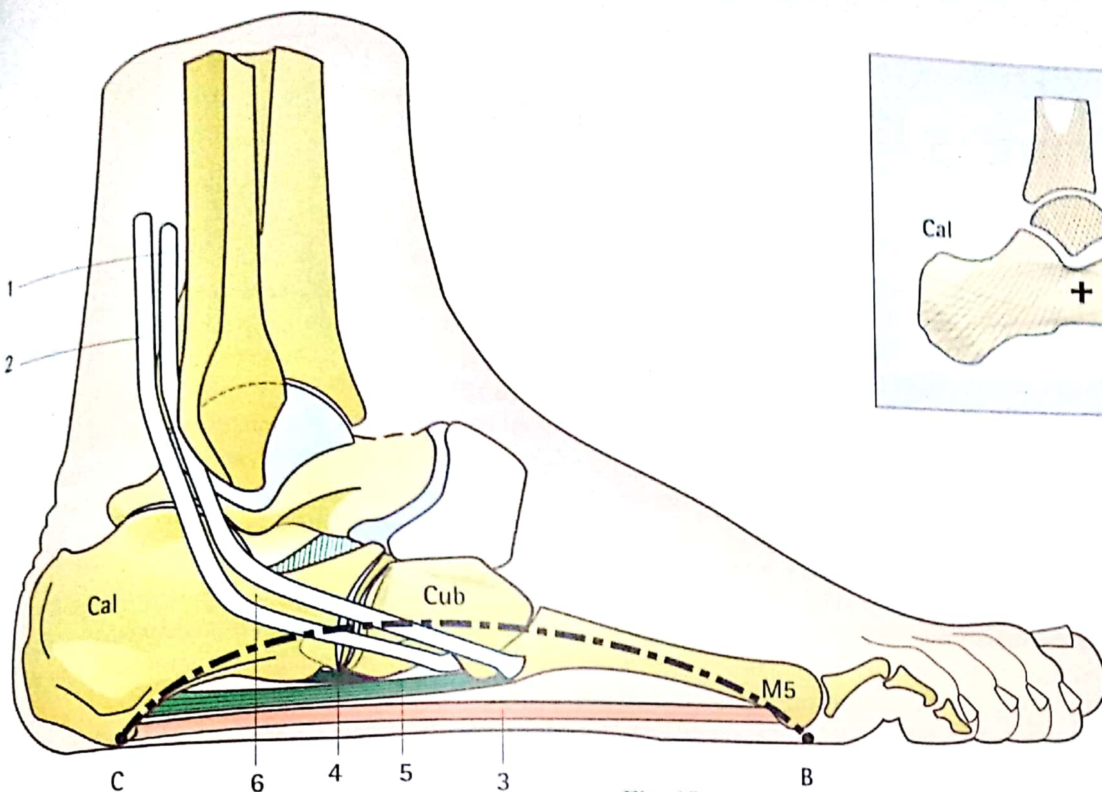


Fig. 18

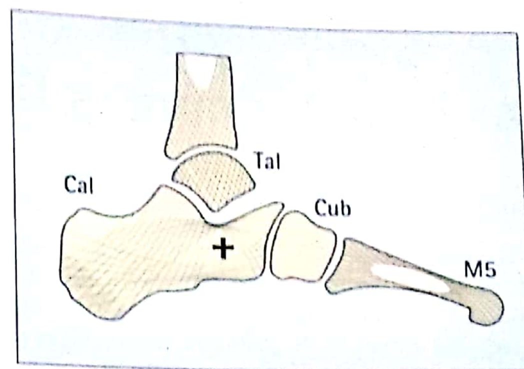


Fig. 19

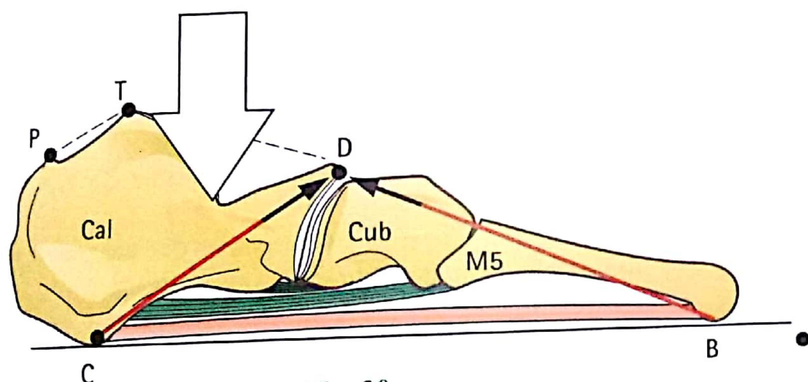


Fig. 20

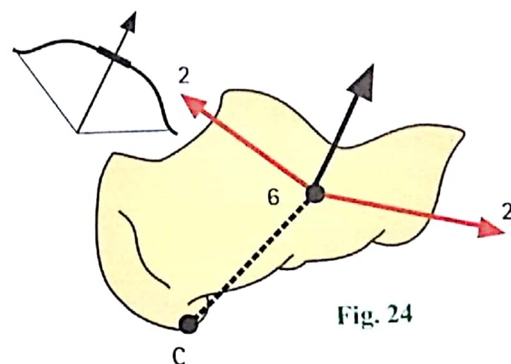


Fig. 24

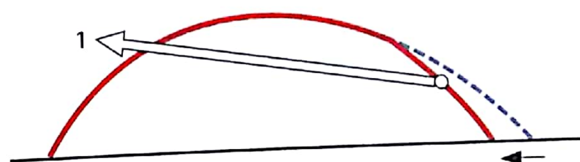


Fig. 22

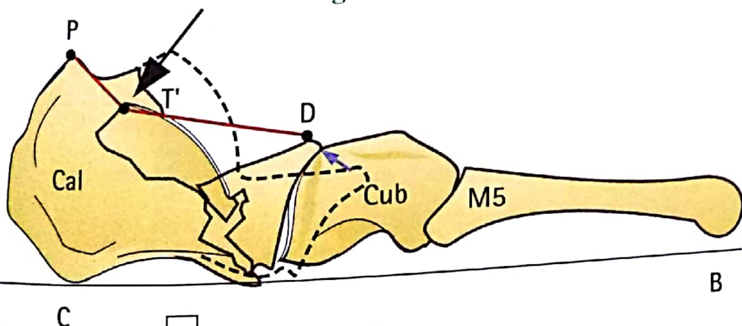


Fig. 21

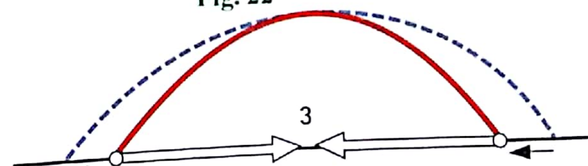


Fig. 25

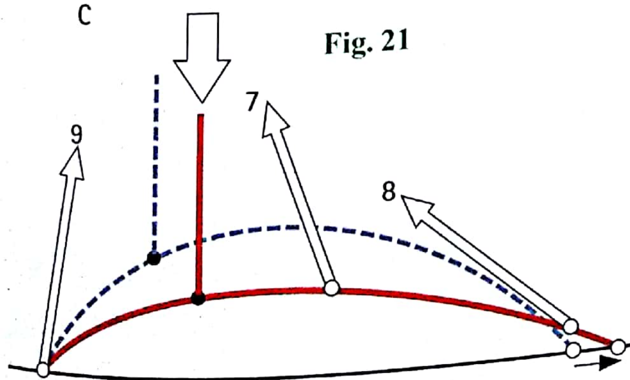


Fig. 26

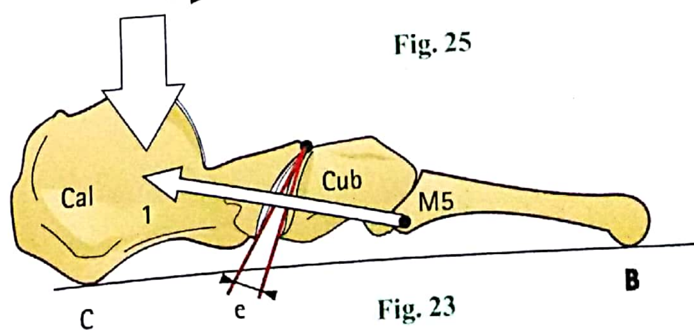


Fig. 23

L'arche antérieure et la courbure transversale

L'**arche antérieure (Fig. 27, coupe I)** est tendue de la tête du premier métatarsien, reposant elle-même sur les deux sesamoïdes, à 6 mm du sol **A**, à la tête du cinquième métatarsien **B**, elle aussi à 6 mm du sol. Cette arche antérieure passe par la tête des autres métatarsiens : la deuxième tête, la plus élevée (9 mm), forme la *clé de voûte*. La troisième (8,5 mm) et la quatrième têtes (7 mm) sont en position intermédiaire.

La **concavité** de cette arche est peu accentuée et elle repose sur le sol par l'intermédiaire des parties molles, constituant ce que certains appellent le « **talon antérieur** » du pied. Cette arche est sous-tendue par le ligament intermétatarsien, sans grande efficacité, et par un seul muscle, le faisceau transverse de l'adducteur de l'hallux **1**, qui forme une série de cordes partielles et totales entre la tête du premier métatarsiens et celle des quatre autres. C'est un muscle relativement peu puissant et facilement forcé.

L'arche antérieure est souvent *effondrée* – **avant-pied plat** – ou même *inversée* – **avant-pied convexe** –, ce qui entraîne la formation de durillons sous les têtes métatarsiennes abaissées (voir Fig. 89 et 90, p. 259).

L'arche antérieure est l'*aboutissement des cinq rayons métatarsiens*. Le premier rayon **(Fig. 29)** est le plus érigé, formant selon Fick un angle de 18 à 25° avec le sol. Cet angle métatarsien/sol décroît ensuite régulièrement : 15° pour le deuxième **(Fig. 30)**, 10° pour le troisième **(Fig. 31)**, 8° pour le quatrième **(Fig. 32)** et il n'est plus que de 5° pour le cinquième métatarsien **(Fig. 33)**, presque parallèle au sol.

La **courbure transversale de la voûte** se poursuit d'avant en arrière. Au niveau des **cunéiformes (Fig. 27, coupe II)**, l'arc transversal ne comprend plus que quatre os et ne repose que par son extrémité externe au niveau du cuboïde **Cub**. Le premier cunéiforme **C1** est entièrement suspendu, sans contact avec le sol ; le deuxième cunéiforme **C2** forme la clé de voûte **(vert clair)** et constitue, avec le deuxième métatarsien qui le prolonge en avant, l'axe du pied, la *faîtière de la voûte*. Cet arc est sous-tendu par le tendon du long fibulaire **2** qui agit ainsi puissamment sur la courbure transversale.

Au niveau du **couple scaphoïde/cuboïde (Fig. 27, coupe III)**, l'arc transversal ne repose que par son extrémité externe formée par le cuboïde **Cub**. Le scaphoïde **S**, suspendu au-dessus du sol, repose en porte-à-faux sur le cuboïde par son extrémité externe. La courbure de cet arc est maintenue par les expansions plantaires du tibial postérieur **3**.

Une vue inférieure du pied (gauche) supposé transparent **(Fig. 28)** montre *comment la courbure transversale de la voûte est maintenue par trois muscles*, qui sont successivement, d'avant en arrière :

- le **muscle adducteur de l'hallux 1** à direction transversale ;
- le **muscle long fibulaire 2**, le plus important sur le plan dynamique, formant un système tendeur oblique en avant et en dedans et *agissant sur les trois arches* ;
- les **expansions plantaires du muscle tibial postérieur 3**, jouant un rôle surtout statique et constituant un système tendeur oblique en avant et en dehors.

La **courbure longitudinale** de l'ensemble de la voûte est contrôlée par :

- le **muscle adducteur de l'hallux 4** en dedans, plus le **muscle long fléchisseur de l'hallux** (non figuré) ;
- par le **muscle abducteur du cinquième orteil 5** en dehors.

Entre ces deux tendeurs extrêmes, le **muscle long fléchisseur des orteils** (non figuré) et son accessoire, le **muscle court fléchisseur plantaire 6**, maintiennent la courbure longitudinale des trois rayons médians et aussi du rayon externe.

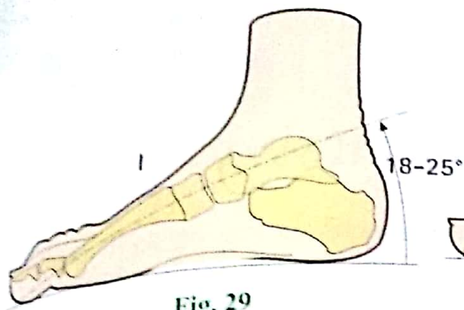


Fig. 29

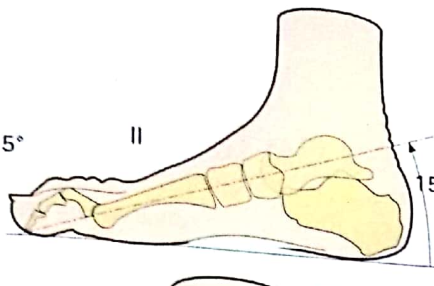


Fig. 30

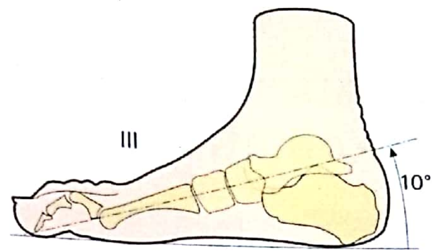
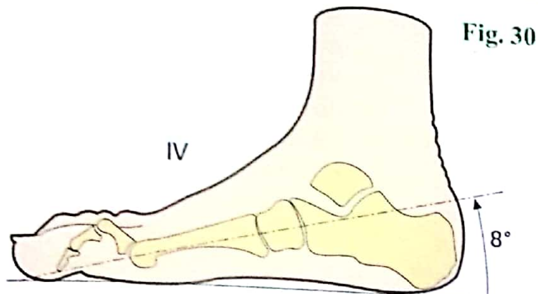


Fig. 31



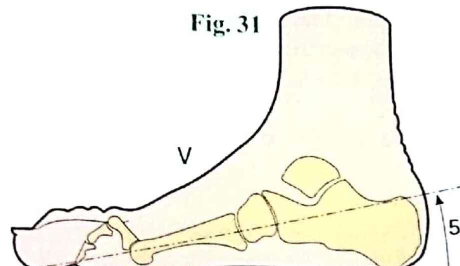


Fig. 32

Fig. 33

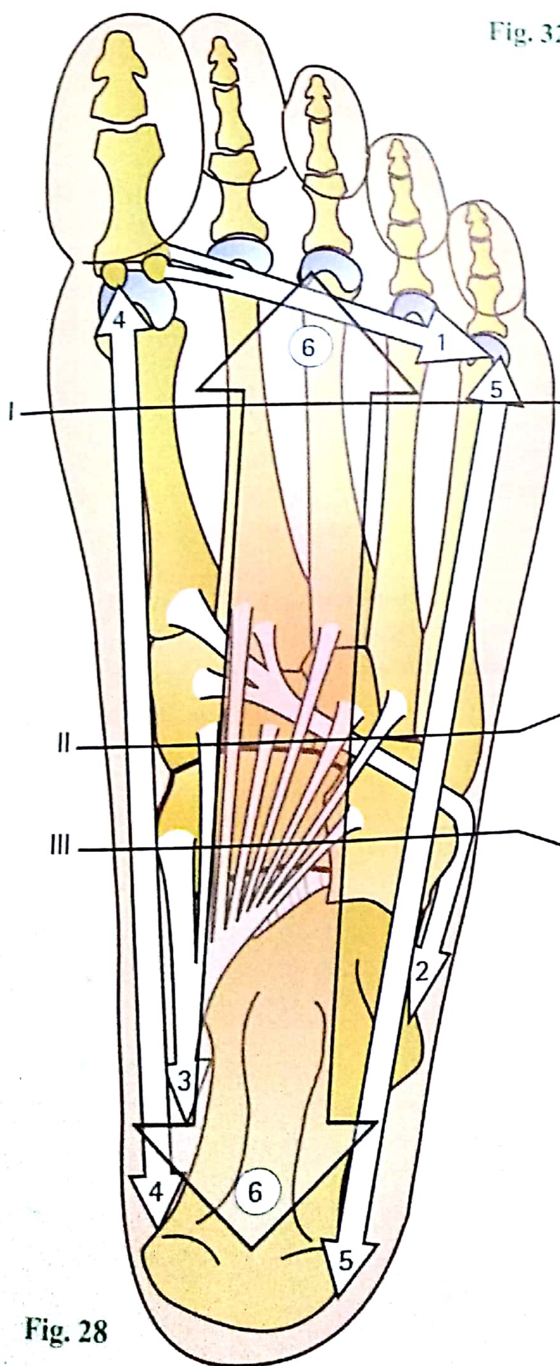


Fig. 28

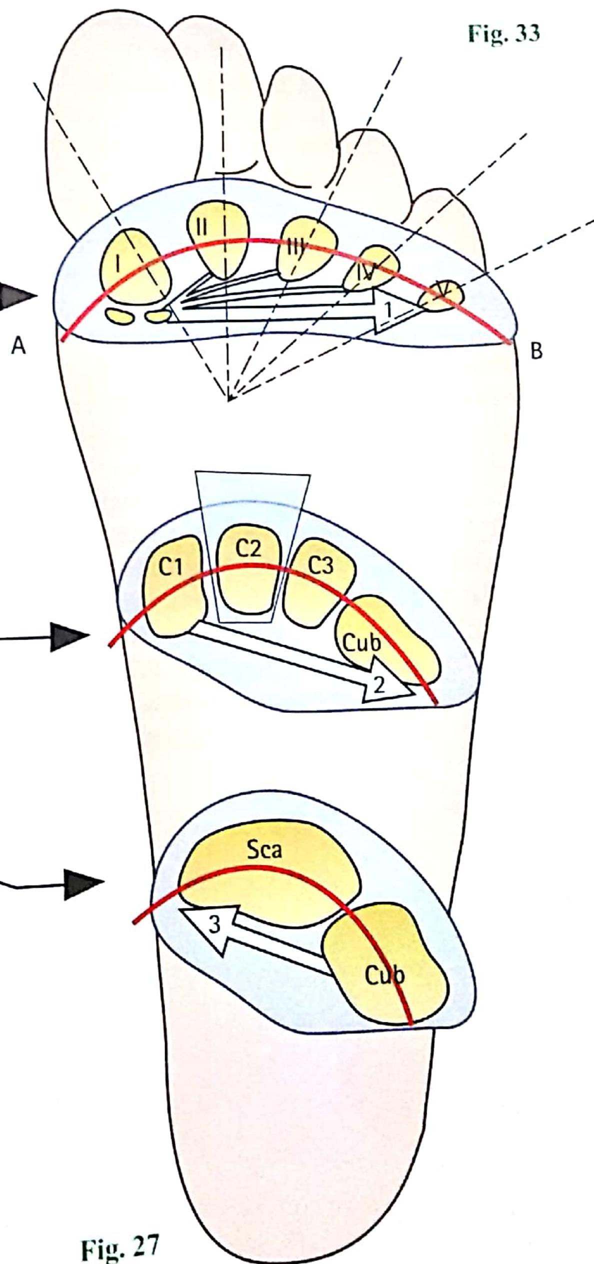


Fig. 27

Répartition des charges et déformations statiques de la voûte plantaire

Le **poids du corps**, transmis par le membre inférieur, s'applique sur le tarse postérieur **(Fig. 34 : vue supérieure du squelette du pied)** au niveau de la **trochlée du talus (croix rouge)** et à travers l'**articulation talo-crurale**. De là, les efforts se répartissent dans **trois directions**, vers les trois points d'appui de la voûte (Seitz, *1901)* :

- vers l'**appui antérieur et interne A**, à travers le col de le talus, dans l'arc-boutant antérieur de l'arche interne ;
- vers l'**appui antérieur et externe B**, à travers la tête du talus et le grand processus du calcanéus, dans l'arc-boutant antérieur de l'arche externe. La direction divergente de ces deux lignes de force, vers A et vers B, forme un angle aigu de 35-40°, ouvert en avant, qui correspond sensiblement à l'angle compris entre l'axe du col et l'axe du corps du talus ;
- vers l'**appui postérieur C**, à travers le corps du talus, l'articulation subtalaire et le corps du calcanéus par l'éventail subthalamique, dans les arc-boutants postérieurs et confondus des arches interne et externe.

La répartition relative des efforts sur les trois points d'appui de la voûte *(Fig. 35)* est facile à retenir si l'on pense que lorsque 6 kg sont appliqués sur le talus, il en revient **un** pour l'appui antéro-externe **B**, **deux** pour l'appui antéro-interne **A** et **trois** pour l'appui postérieur **C** *(Morton, 1935)*. En position debout, verticale et immobile, c'est donc le talon qui supporte le principal effort : la moitié du poids du corps. On comprend alors que lorsque cet effort est concentré sur un demi-centimètre carré de talon aiguille, il « poinçonne » les sols plastiques.

Sous la charge, chaque arche s'écrase et s'allonge :

- au niveau de l'**arche interne (Fig. 36 : vue interne)**, les tubérosités postérieures du calcanéus, distantes du sol de 7 à 10 mm, s'abaissent de 1,5 mm ; le petit processus de 4 mm ; le talus recule sur le calcanéus ; le scaphoïde remonte sur la tête du talus tout en s'abaissant par rapport au sol ; les articulations scapho-cunéennes et cunéo-métatarsiennes bâillent vers le bas ; l'angle d'érection du premier métatarsien diminue ; **le talon recule et les sésamoïdes avancent légèrement** ;
- au niveau de l'**arche externe (Fig. 37)**, mêmes déplacements verticaux du calcanéus ; abaissement du cuboïde de 4 mm, du styloïde du cinquième métatarsien de 3,5 mm ; bâillement vers le bas des articulations calcanéo-cuboïdienne et cuboïdo-métatarsienne ; **recul du talon et avancée de la tête du cinquième métatarsien** ;
- au niveau de l'**arche antérieure (Fig. 38 : coupe des métatarsiens)**, l'arche s'écrase et s'étale de part et d'autre du deuxième métatarsien. L'écart s'accroît de 5 mm entre le premier et le deuxième métatarsien, de 2 mm entre le deuxième et le troisième, de 4 mm entre le troisième et le quatrième, de 1,5 mm entre le quatrième et le cinquième ; si bien qu'au total **l'avant-pied s'élargit de 12,5 mm** sous appui. Lors du temps antérieur du pas, la courbure de l'arche antérieure disparaît et toutes les têtes métatarsiennes reposent sur le sol, suivant des pressions diverses ;
- la **courbure transversale** diminue aussi au niveau des cunéiformes **(Fig. 39 : coupe des cunéiformes)** et au niveau du scaphoïde **(Fig. 40 : coupe scaphoïde-cuboïde)** en même temps que ces deux arcs ont tendance à basculer autour de leur appui externe d'un angle x proportionnel à l'aplatissement de l'arche interne.

En outre **(Fig. 41 : vue supérieure du pied droit)**, la tête du talus est déportée en dedans de 2 à 6 mm et le grand processus de 2 à 4 mm. Il s'ensuit une **cassure-torsion du pied au niveau de l'articulation médio-tarsienne** : l'axe de l'arrière-pied *se déporte en dedans* tandis que l'axe de l'avant-pied *dévie en dehors*, formant un angle **y** avec le précédent. L'arrière-pied tourne en **adduction-pronation (flèche 1)** et en **légère extension**, alors que l'avant-pied effectue un mouvement relatif de **flexion-abduction-supination (flèche 2)**. Ce phénomène est particulièrement marqué dans le **pied plat valgus** (voir p. 254).

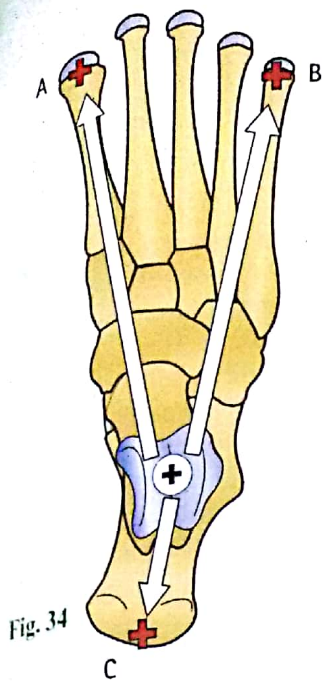


Fig. 34

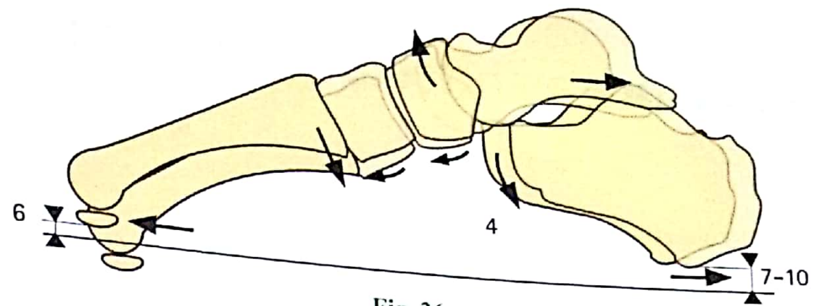


Fig. 36

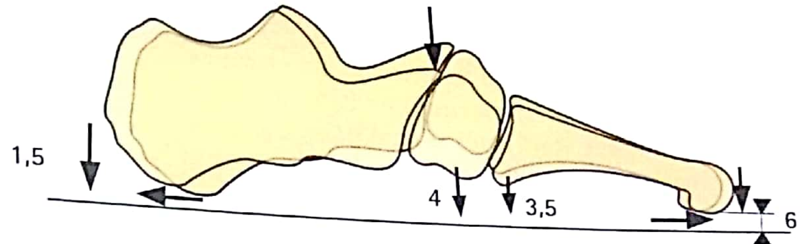


Fig. 37

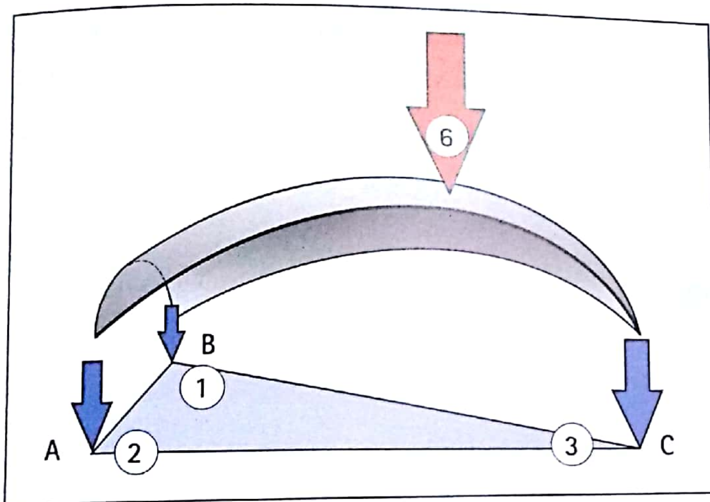


Fig. 35

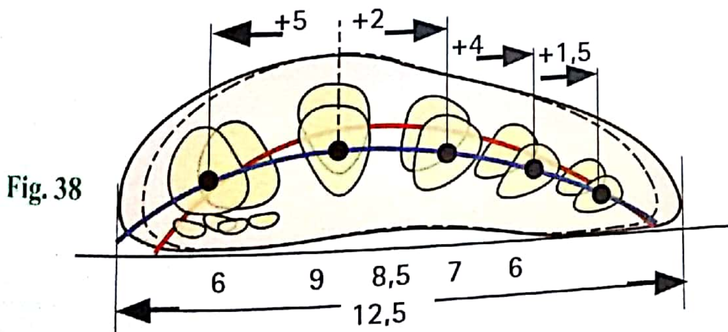
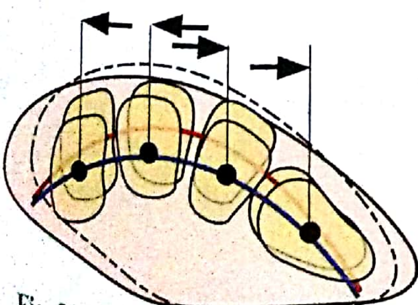


Fig. 38


Fig. 39

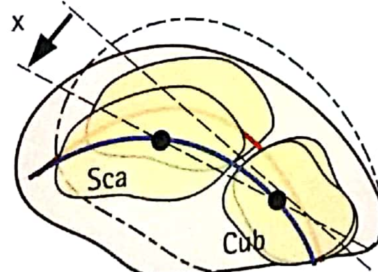


Fig. 40

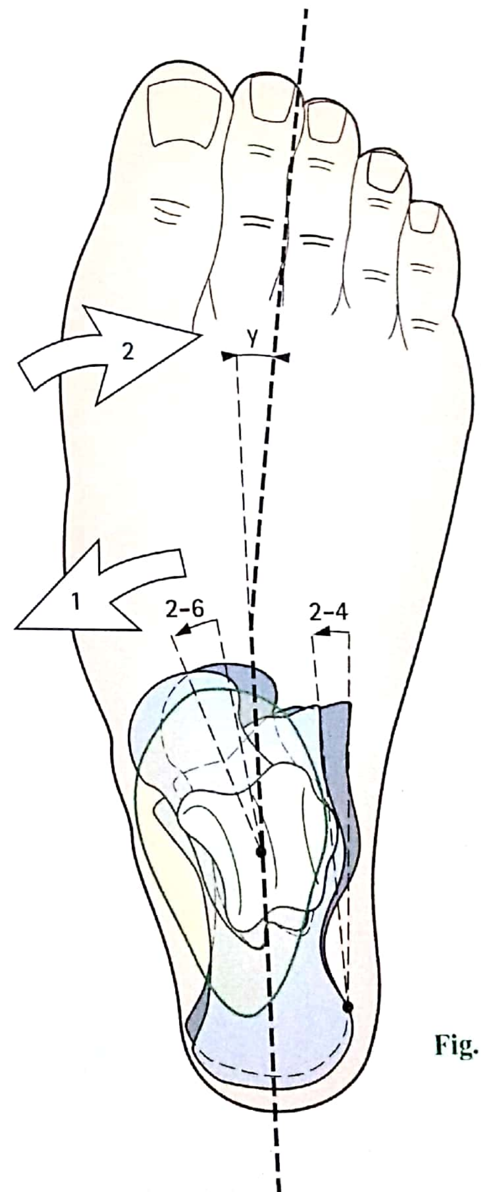


Fig. 41

L'équilibre architectural du pied

Le pied est une **structure triangulaire (Fig. 42)**, avec :

- un **côté inférieur A**, la base ou encore la voûte, sous-tendues par les muscles et les ligaments plantaires ;
- un **côté antéro-supérieur B**, qui est occupé par les muscles fléchisseurs de la cheville et les extenseurs des orteils ;
- un **côté postérieur C**, comportant les muscles extenseurs de la cheville et les fléchisseurs des orteils.

Une forme normale de la plante, qui conditionne son adaptation correcte au sol, est le **résultat d'un équilibre entre les forces propres à chacun de ces trois côtés (Fig. 43)**, organisés sur trois rayons squelettiques articulés entre eux au niveau de la cheville et du complexe articulaire du tarse postérieur :

- une **exagération de la courbure plantaire**, réalisant un **pied creux**, peut aussi bien découler d'une rétraction des ligaments plantaire ou d'une contracture des muscles plantaires, que d'une insuffisance des muscles fléchisseurs de la cheville ;
- un **aplatissement de la courbure plantaire**, ou **pied plat**, peut aussi bien être dû à une insuffisance des formations ligamentaires ou musculaires plantaires qu'à un tonus exagéré des muscles antérieurs ou postérieurs.

Nous retrouvons ici cette notion d'**équilibre trilatéral** (Fig. 44), illustré par la planche à voile, qui nous a permis de comprendre l'équilibre dynamique du genou. La stabilité est sans cesse le résultat d'un équilibre dynamique à trois facteurs :

- la flottaison par la poussée d'Archimède ;
- la propulsion par la force du vent dans la voile ;
- les compensations instantanées par l'application du poids de l'homme modulée sur la voile et sur la planche.

Notre esprit dit « cartésien » a l'habitude des équilibres à deux facteurs, mais **il a beaucoup plus de difficultés à saisir intuitivement les équilibres à trois facteurs et plus**... Dans certains cas, il existe même des équilibres à facteurs multiples qui s'apparentent aux *mobiles de Calder*, peintre et sculpteur, inventeur de ces équilibres multiples.

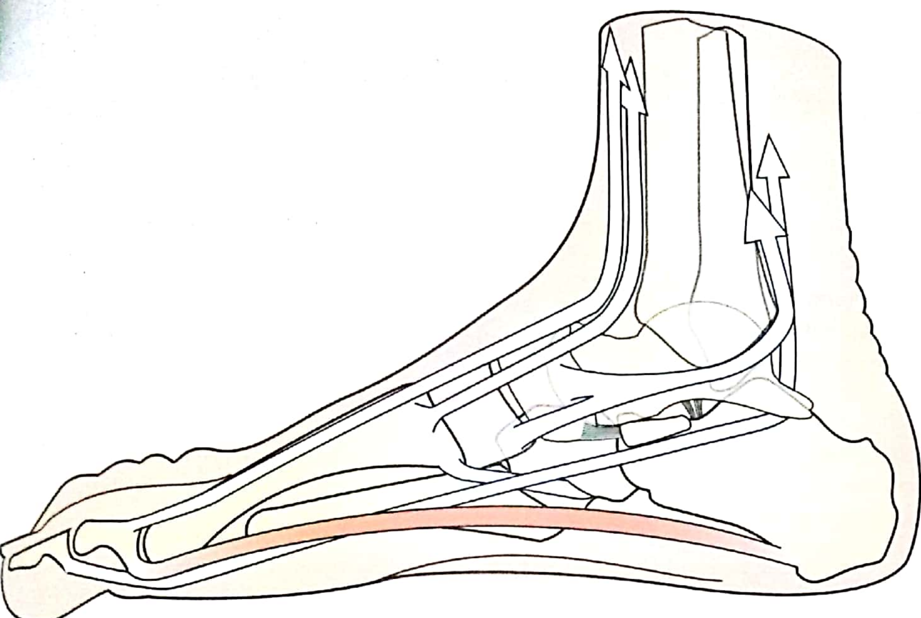


Fig. 42

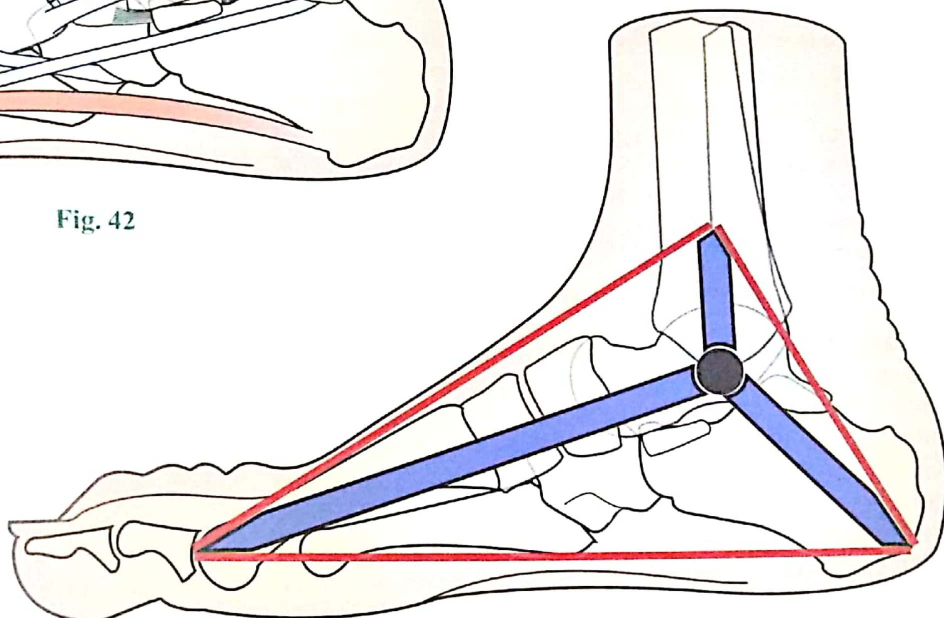


Fig. 43

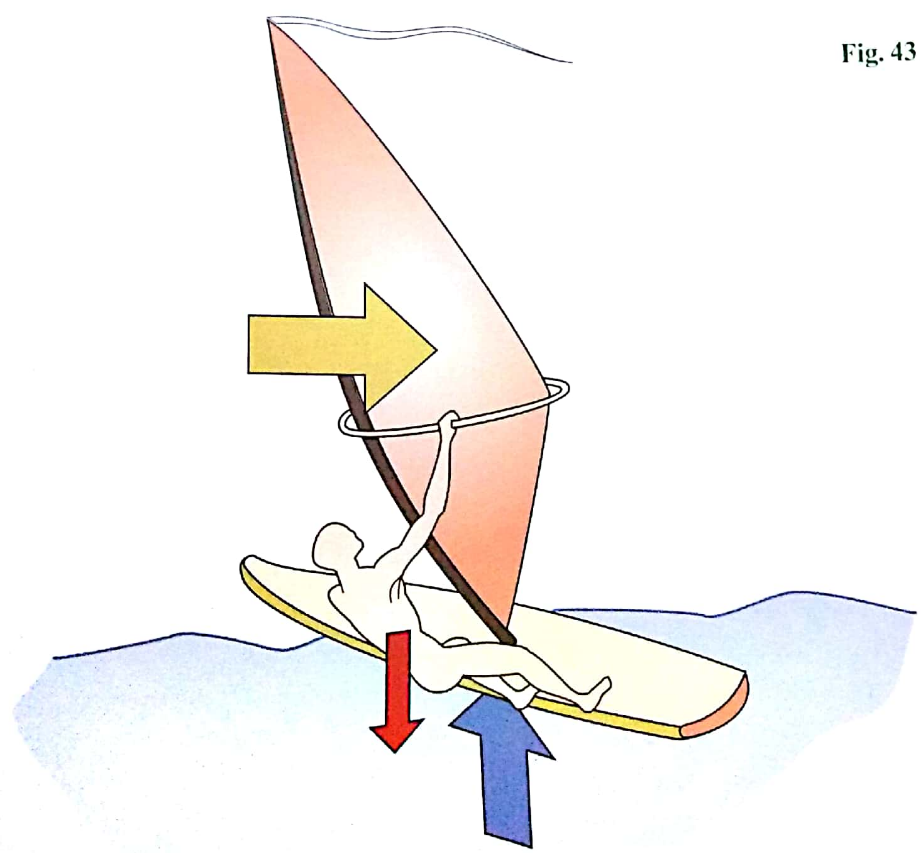


Fig. 44

Déformations dynamiques de la voûte plantaire pendant la marche

Pendant la marche, le **déroulement du pas** va imposer à la voûte plantaire des efforts et des déformations qui mettent bien en lumière son rôle d'amortisseur élastique. Le déroulement du pas s'effectue en quatre temps.

Premier temps : prise de contact avec le sol (Fig. 45)

Lorsque le membre oscillant lancé en avant est sur le point d'« atterrir », la cheville est en rectitude ou même **en légère flexion (Fig. 45)** du fait de l'action des muscles fléchisseurs de l'articulation talo-crurale **F**. Le pied prend donc contact avec le sol *par le talon*, c'est-à-dire le point d'appui postérieur **C** de la voûte. Immédiatement, sous la *poussée de la jambe* **(flèche rouge)**, le reste du pied s'abat sur le sol **(flèche 1)** tandis que *la cheville est portée passivement en extension*.

Deuxième temps : contact maximum (Fig. 46)

La plante du pied repose alors sur le sol par toute sa surface portante **(Fig. 46)** qui constitue l'empreinte plantaire. Le corps, propulsé par l'autre pied, va passer au-dessus, puis en avant du pied porteur : c'est le **temps de l'appui unilatéral**. La cheville est donc portée passivement de la position d'extension précédente à la **position de flexion (flèche 2)**. En même temps, le poids du corps **(flèche rouge)** va s'appliquer en totalité sur la voûte plantaire qui s'écrase. Simultanément, la contraction de tous les tendeurs plantaires **P** s'oppose à cet affaissement de la voûte : c'est le **premier effet d'amortissement** ; en s'écrasant, la voûte s'allonge légèrement : au début du mouvement, c'est l'appui antérieur **A** *qui avance légèrement*, mais sur la fin, lorsque l'appui antérieur est de plus en plus fixé sur le sol par le poids du corps, c'est l'appui postérieur **C**, le talon, *qui recule*. La surface de l'empreinte plantaire est **maximum lorsque la jambe passe à la verticale du pied**.

Troisième temps : première impulsion motrice (Fig. 47)

Le poids du corps étant maintenant en avant du pied porteur, la **contraction des extenseurs de la cheville T**, particulièrement du triceps, va *soulever le talon* **(flèche 3)**. Tandis que l'articulation talo-crurale est portée activement ***en extension***, l'ensemble de la voûte effectue une **rotation autour de son appui antérieur A**. Le corps est *soulevé et porté en avant* : c'est la première impulsion motrice, la plus importante car elle met en jeu des muscles puissants. Cependant, la voûte, prise entre le sol en avant, la force musculaire en arrière et le poids du corps au milieu – c'est un levier du deuxième genre, dit interrésistant – tendrait à s'écraser si n'intervenaient encore les tendeurs plantaires **P** : c'est le *deuxième effet d'amortissement*, qui permet d'emmagasiner une partie de la force du triceps pour la restituer à la fin de l'impulsion. D'autre part, c'est au moment de l'appui antérieur que *l'arche antérieure s'écrase à son tour* **(Fig. 48)** et que *l'avant-pied s'étale sur le sol* **(Fig. 49)**.

Quatrième temps : deuxième impulsion motrice (Fig. 50)

L'impulsion fournie par le triceps est prolongée par une deuxième impulsion **(flèche 4)**, due à la **contraction des muscles fléchisseurs des orteils f**, surtout les muscles sésamoïdiens et le long fléchisseur de l'hallux. Le pied, porté une fois de plus en haut et en avant, *quitte l'appui sur le talon antérieur et ne repose plus que sur les trois premiers orteils* **(Fig. 51)**, l'hallux surtout, en appui terminal. Pendant cette deuxième impulsion motrice, *la voûte plantaire résiste*, une fois de plus, à l'écrasement grâce aux tendeurs plantaires, dont les fléchisseurs des orteils. C'est à la fin de ce temps que l'énergie qu'ils ont emmagasinée se trouve restituée. *Le pied quitte le sol alors que l'autre commence à dérouler son pas.* Les deux pieds ont donc été un court instant en contact simultanément avec le sol : c'est la **période du double appui**. Pendant la période suivante, dite d'appui unilatéral, la voûte du pied oscillant – celui qui vient de quitter le sol – revient sur elle-même, retrouvant sa concavité du fait de son élasticité propre.

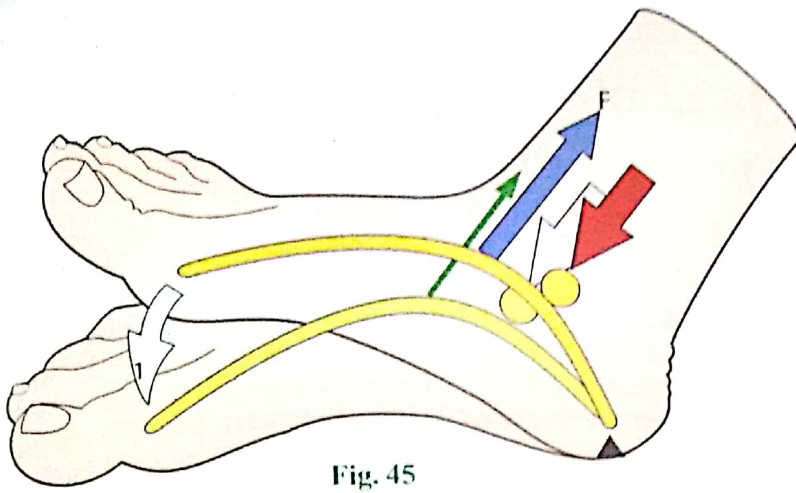


Fig. 45

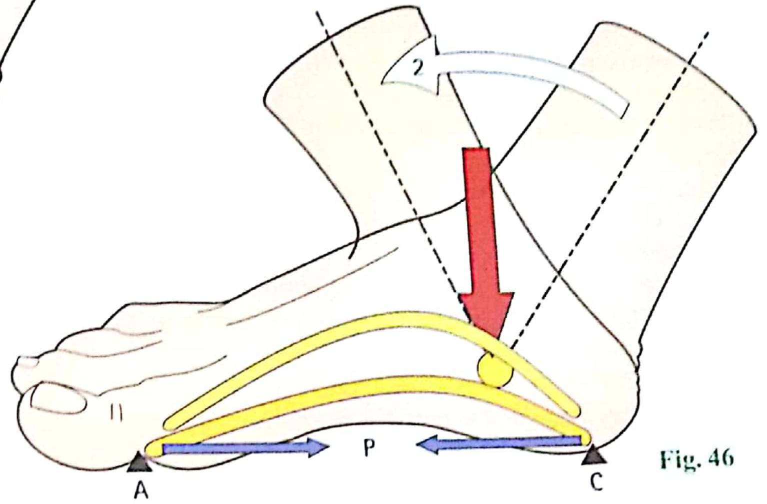


Fig. 46

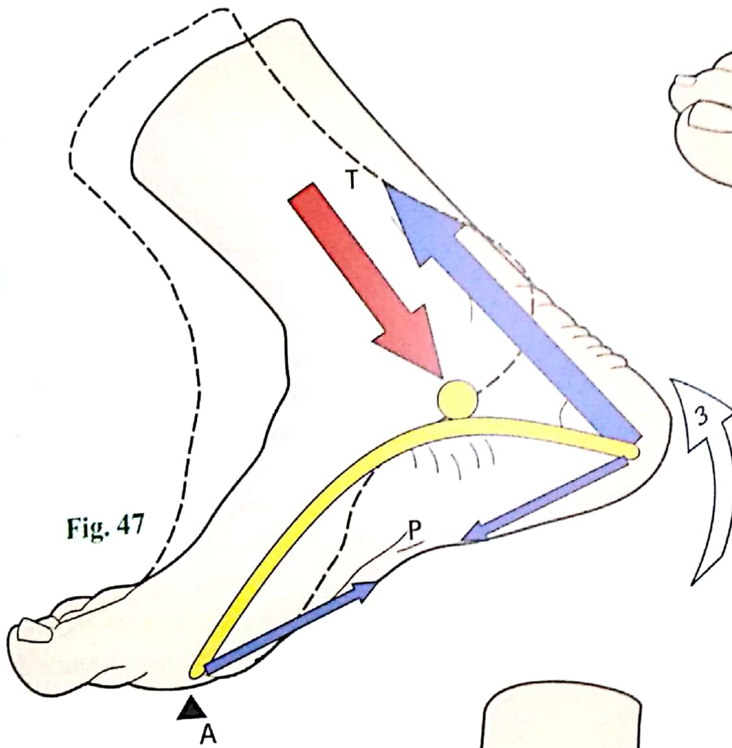


Fig. 47

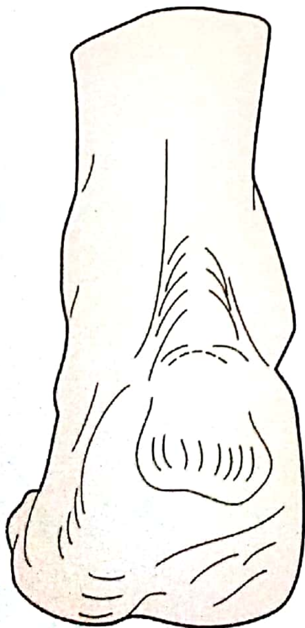


Fig. 48

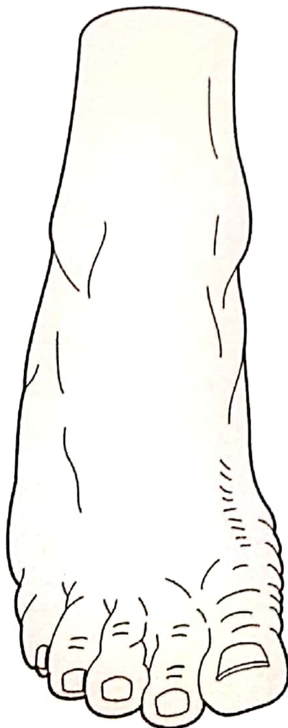


Fig. 49

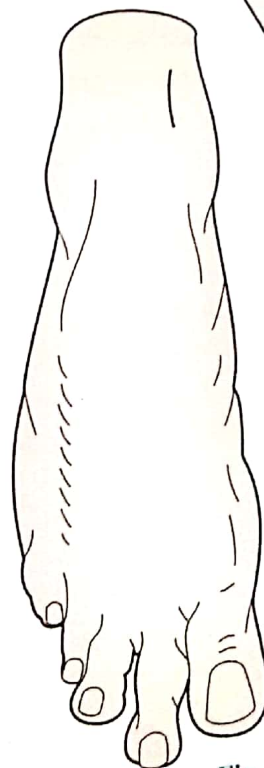


Fig. 51

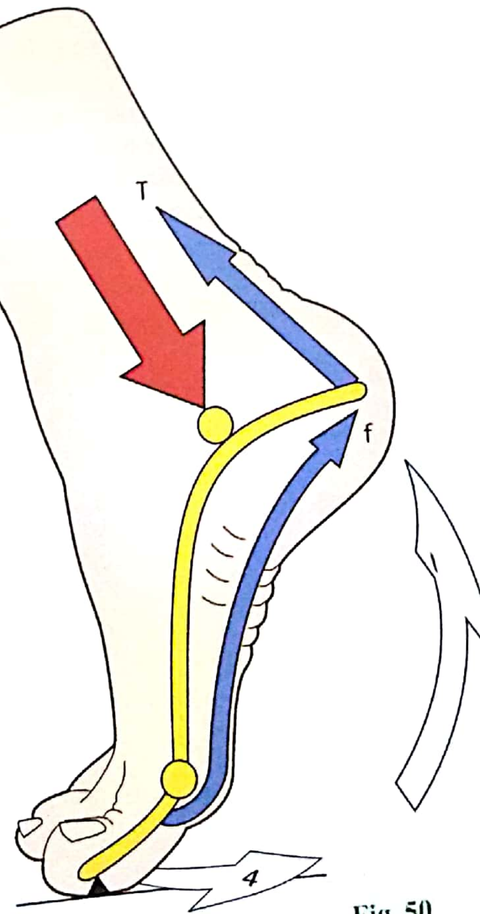


Fig. 50

Déformations dynamiques de la plante suivant l'inclinaison de la jambe sur le pied en inversion

Nous avons envisagé dans les pages précédentes les modifications apportées à la voûte plantaire pendant le pas, c'est-à-dire les différentes inclinaisons de la jambe sur le pied dans le plan sagittal.

Cependant, lors de la marche ou de la course en courbes ou en terrain accidenté, *il est indispensable que la jambe puisse s'incliner sur le pied dans le plan frontal*, c'est-à-dire *en dehors ou en dedans de l'empreinte plantaire*. Ces mouvements d'inclinaison latérale s'effectuent dans les articulations subtalaire et médio-tarsienne et entraînent des modifications de forme de la voûte plantaire. Par contre, l'articulation talo-crurale n'est pas sollicitée et le talus, fixé dans la pince bi-malléolaire, se meut par rapport aux autres os du tarse.

L'inclinaison de la jambe en dedans par rapport au pied posé sur le sol et considéré comme fixe correspond à une **inversion (Fig. 52)** et elle a **quatre conséquences**.

- La **rotation externe de la jambe sur le pied (flèche 1)**, qui n'apparaît que lorsque la plante du pied est étroitement appliquée sur le sol. Elle se manifeste par le *recul de la malléole latérale*, nettement visible si l'on compare avec la position où le pied, perpendiculaire à la jambe, n'est en contact avec le sol que par son bord interne **(Fig. 53 : vue de face du pied en position normale)**. Cette rotation externe de la pince bi-malléolaire entraîne le *glissement de le talus vers le dehors*, particulièrement de sa tête dans la concavité du scaphoïde.
- L'**abduction-supination de l'arrière-pied (Fig. 54)**. L'abduction est due à une fraction non compensée de rotation externe. Quant à la supination, elle découle du mouvement du calcanéus vers le dedans, constatable sur cette vue arrière par l'angle x que forme l'axe du talon avec celui de la jambe, en comparant avec un pied non appliqué au sol **(Fig. 55 : vue postérieure du pied en position normale)** : ce « varus » du calcanéus se marque par l'**incurvation du bord interne du tendon calcanéen**.
- L'**adduction-pronation de l'avant-pied (Fig. 52)**. Pour que l'arche antérieure s'applique sur le sol, l'avant-pied est amené à se déplacer en dedans. Durant cette modification de l'arche interne, le plan sagittal **P** passant par l'axe de l'avant-pied, représenté par le deuxième métatarsien, tourne en dedans pour prendre la position finale **P'**. Entre les deux positions **P** et **P'**, l'angle **m** mesure cette adduction. Par ailleurs, l'avant-pied effectue une **pronation** ; mais il est bien évident que ces mouvements d'adduction-pronation sont des *mouvements relatifs* à ceux de l'arrière-pied. L'articulation médio-tarsienne en est le siège.
- Le **creusement de l'arche interne (Fig. 52)**. Cette accentuation de courbure de l'arche interne **(flèche 2)** est elle-même la conséquence des mouvements relatifs de l'avant-pied par rapport à l'arrière-pied. Elle se manifeste par l'élévation du scaphoïde par rapport au sol, phénomène à la fois *passif*, par glissement en dehors de la tête du talus, et *actif* par contraction du muscle tibial postérieur. La modification de la courbure globale de la voûte plantaire se traduit sur l'empreinte plantaire dont le golfe se creuse, comme dans un **pied creux varus**.

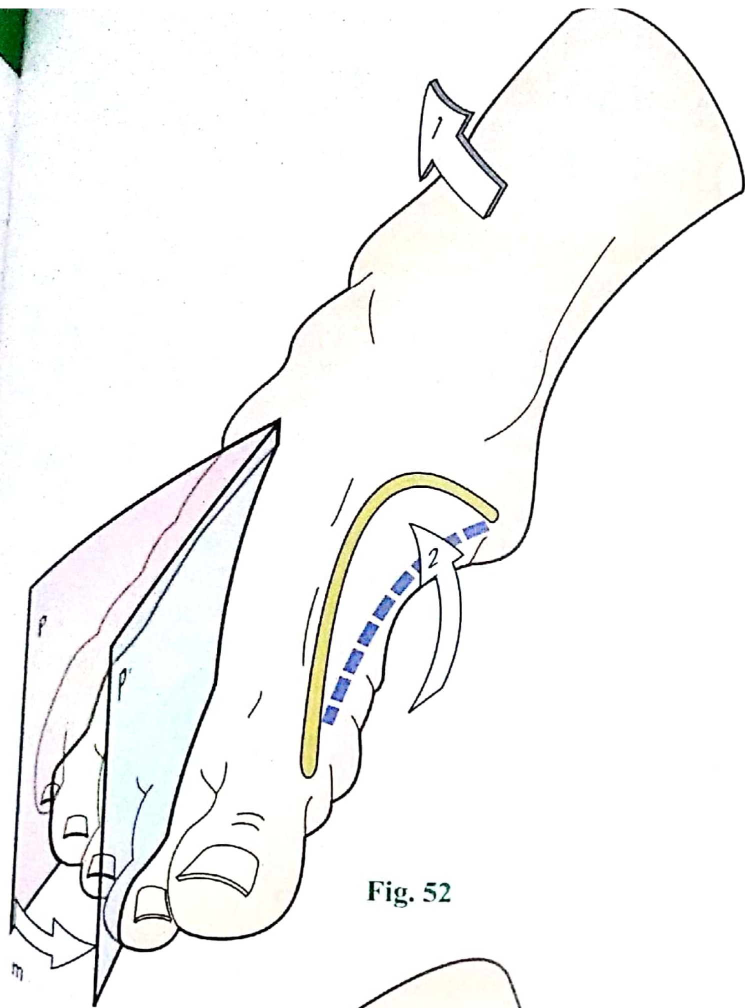


Fig. 52


Fig. 53

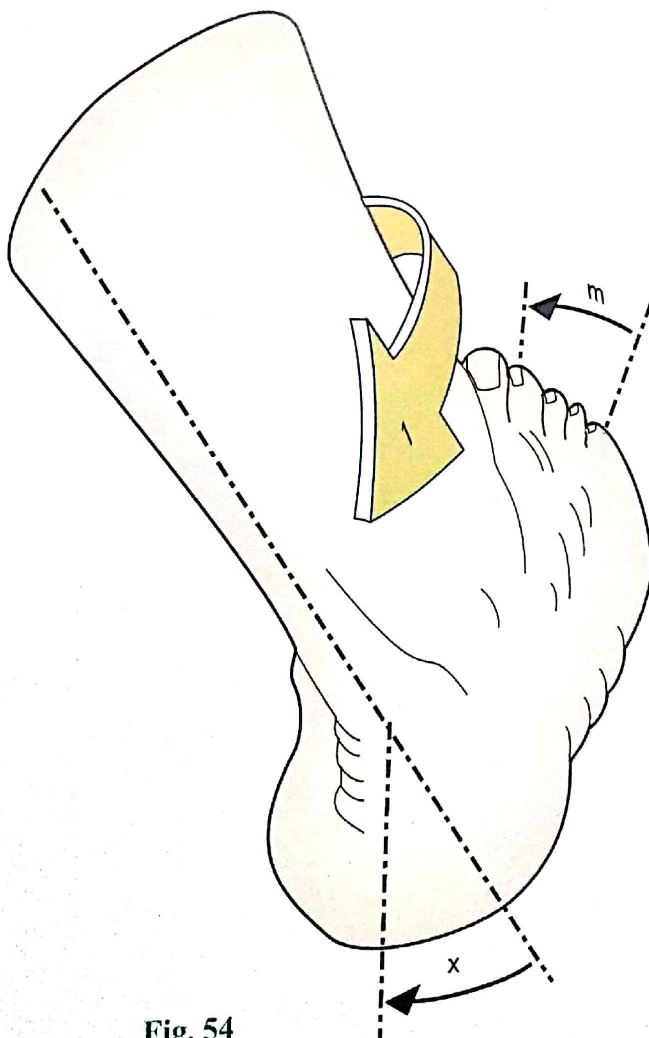


Fig. 54


Fig. 55

Déformations dynamiques de la plante suivant l'inclinaison de la jambe sur le pied en éversion

Lors d'une marche sur un terrain incliné, dans une direction perpendiculaire à la pente (Fig. 62 p. 253), il est obligé que l'un des pieds soit en inclinaison interne – en inversion –, et l'autre en inclinaison externe – en éversion –, afin que les membres inférieurs et le corps tout entier conservent une position verticale. Sur ce schéma, le pied droit est en position d'inversion et le gauche en position d'éversion.

L'inclinaison de la jambe *en dehors* par rapport au pied supposé fixe et appliqué au sol est une **position d'éversion**. Cette position (**Fig. 55 : vue antéro-interne du pied en éversion**) a **quatre conséquences symétriques à celles de l'inversion**.

- La **rotation interne de la jambe sur le pied** (flèche 3) : recul de la malléole médiale visible en comparant avec une position où le pied ne repose que par son bord externe sans être appliqué au sol (Fig. 57). On constate aussi un glissement du talus en dedans, dont la tête fait saillie au bord interne du pied.
- **L'adduction-pronation de l'arrière-pied** (Fig. 58 : **vue postéro-interne du pied en éversion**) : adduction par rotation interne non entièrement compensée, pronation par valgus du calcanéus qui détermine un angle y ouvert en dehors entre l'axe du talon et celui de la jambe, visible en comparant avec la position libre du pied (Fig. 59).
- **L'abduction-supination de l'avant-pied** (Fig. 55) perceptible, comme pour l'inversion, par l'angle d'abduction α formé entre les plans P et P'.
- **L'aplatissement de l'arche interne** (flèche 4) avec accroissement de surface de l'empreinte plantaire, qui comble le golfe interne, comme dans un **pied plat valgus**.

Ces positions d'adaptation du pied à la pente du terrain, ou bien lors des virages, dépendent du fonctionnement des articulations subtalaire et médio-tarsienne, **indispensables à une marche normale en terrain accidenté.**

Scanned by CamScanner

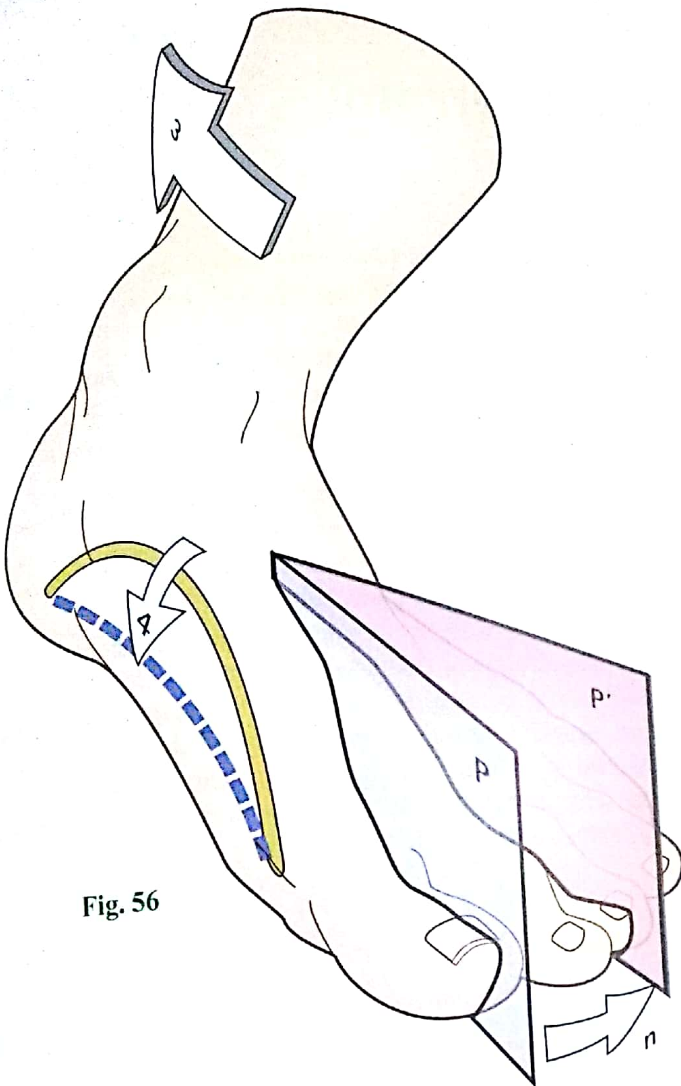
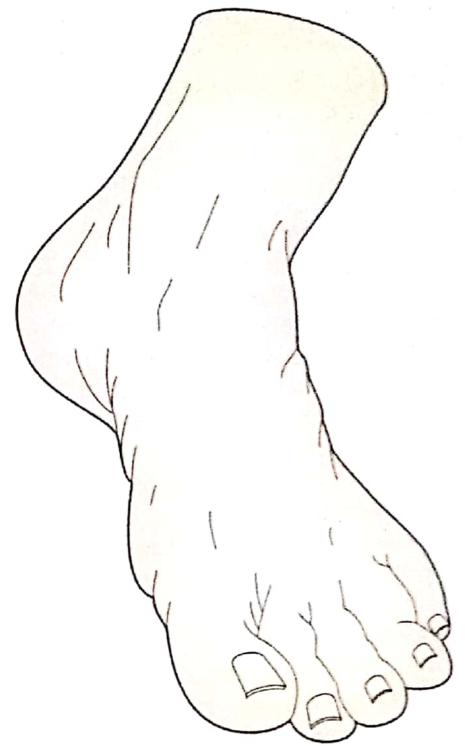


Fig. 56


Fig. 57

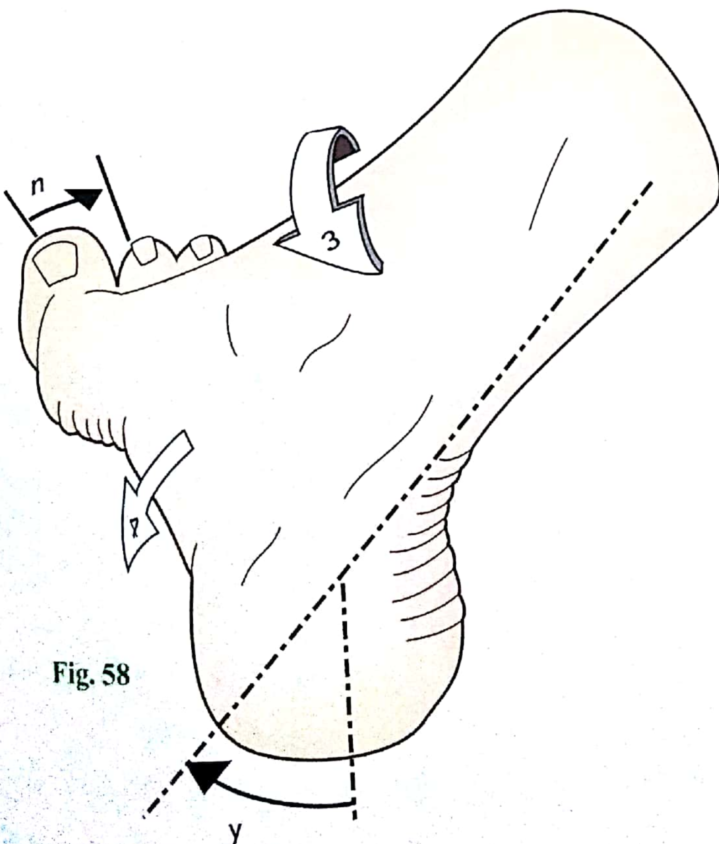
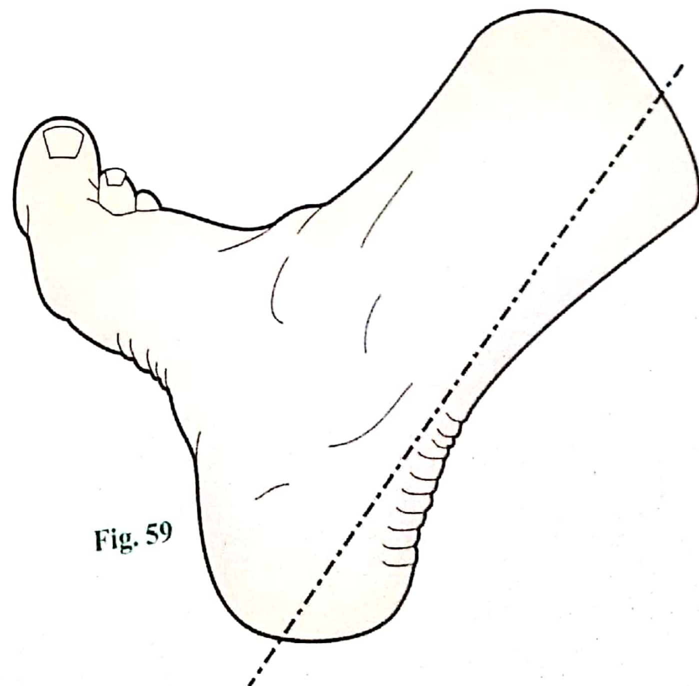


Fig. 58


Fig. 59

Adaptation de la voûte plantaire au terrain

L'homme des villes marche toujours sur un sol uni et résistant, les pieds protégés par des chaussures. Ses voûtes plantaires n'ont que peu d'effort d'adaptation à faire et les muscles qui en sont les principaux soutiens finissent par s'atrophier. Le pied plat est la rançon du progrès et certains anthropologues n'hésitent pas à prédire les temps où l'homme « marchera » sur des pieds réduits à l'état de moignons. Cette théorie s'appuie sur l'atrophie des orteils et la perte de l'opposition de l'hallux, qui existe toujours chez le singe.

Nous n'en sommes cependant pas là avant longtemps et l'homme, même « civilisé », est encore capable de marcher pieds nus sur une plage ou dans les rochers. Ce « retour à l'état de nature » est extrêmement bénéfique à la voûte plantaire et à bien d'autres choses encore. La voûte plantaire retrouve là ses **possibilités d'adaptation**.

- **L'adaptation aux inégalités du terrain** sur lesquelles le pied s'accroche **(Fig. 60)** grâce au creusement de la voûte.
- **L'adaptation aux inclinaisons du sol** par rapport à la verticalité du corps :

– l'**appui antérieur** est plus étendu dans les inclinaisons en dehors **(Fig. 61)** grâce à la longueur décroissante de dedans en dehors des rayons métatarsiens ;

– dans la **position debout sur une pente transversale** (Fig. 62), le pied « d'aval » est en supination, tandis que le pied « d'amont » est en éversion ou en talus valgus, ainsi que nous l'avons décrit à la page précédente ;

– l'**escalade (Fig. 63)** nécessite l'ancrage du pied d'aval, en position de pied creux varus, perpendiculairement à la ligne de pente, alors que le pied d'amont attaque le sol en flexion maximum et parallèlement à la pente ;

– la **descente (Fig. 64)** oblige parfois à des attitudes du pied en inversion afin d'obtenir une adhérence maximum.

Ainsi, comme la paume de la main qui permet la préhension grâce aux modifications de sa courbure et de son orientation (voir Volume I), la plante du pied peut, dans certaines limites, s'*adapter aux accidents du terrain* pour assurer la meilleure liaison possible avec le sol.


Fig. 63


Fig. 61


Fig. 64

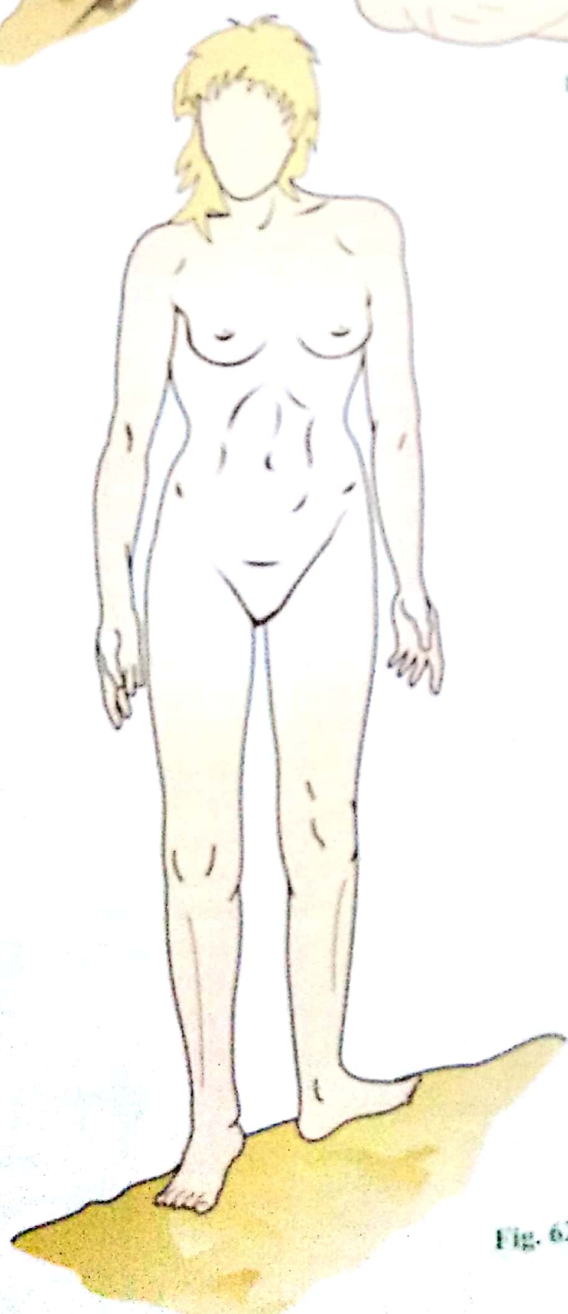

Fig. 62


Fig. 60

Les pieds creux

La courbure et l'orientation de la voûte plantaire dépendent d'un équilibre extrêmement délicat entre les différentes actions musculaires, que le modèle d'Ombrédanne **(Fig. 65 : schéma des éléments squelettiques et musculaires du pied)** permet d'étudier :

- la voûte est **aplatie par le poids du corps (flèche bleue)** et par la contracture des muscles se fixant sur sa convexité : les muscles triceps **1**, tibial antérieur et troisième fibulaire **2**, long extenseur des orteils et long extenseur de l'hallux **3** (pour ces deux derniers, à condition que les premières phalanges restent stabilisées par les muscles interosseux **7**) ;
- la voûte est **creusée par la contracture des muscles** s'insérant dans sa concavité : les muscles tibial postérieur **4**, court et long fibulaires **5**, les muscles plantaires **6** et fléchisseurs des orteils **8**. Elle peut aussi être creusée par un *relâchement des muscles de la convexité*. Par contre, un relâchement des muscles de la concavité donne un aplatissement de la voûte.

L'insuffisance ou la contracture d'un seul des muscles détruit tout l'équilibre et entraîne une déformation ; Duchenne de Boulogne dit qu'à ce point de vue, il vaut mieux que tous les muscles soient paralysés plutôt qu'un seul, car alors le pied conserve une forme et une attitude quasi normales.

On distingue **trois types de pieds creux**.

- Le **pied creux « postérieur » (Fig. 66)**, ainsi appelé parce que le trouble porte sur l'arc-boutant postérieur : insuffisance du muscle triceps **1**. Les muscles de la concavité l'emportent **6**, déterminant le pied creux ; les muscles fléchisseurs de la cheville **2** basculent le pied en flexion. Il s'ensuit donc un pied creux talus « postérieur » **(Fig. 67)**, qui peut, par ailleurs, prendre une inclinaison latérale en valgus **(Fig. 68)** par contracture des abducteurs (muscles long extenseur des orteils et fibulaires).
- Le **pied creux « moyen » (Fig. 69)**, relativement rare, par contracture des muscles plantaires **6** due, par exemple, à des semelles trop rigides, ou par rétraction de l'aponévrose plantaire (maladie de Ledderhose).
- Le **pied creux « antérieur »**, dont il existe plusieurs variétés qui ont toutes en commun une attitude en équin **(Fig. 70)** comportant deux caractéristiques : l'équin de l'avant-pied **c** par abaissement des arcs-boutants antérieurs et la dénivellation entre talons postérieur et antérieur **d** plus ou moins réductible en appui.

Suivant le mécanisme, on définit la variété du pied creux antérieur :

- la contracture du muscle tibial postérieur **4** et des muscles fibulaires **5** détermine l'**abaissement de l'avant-pied (Fig. 71)**. La **contracture des fibulaires** peut suffire à elle seule à entraîner un pied creux (Fig. 72), qui prend alors une inclinaison en valgus : **pied creux valgus équin** ;
- un **déséquilibre des articulations métatarso-phalangiennes (Fig. 73)** est très souvent la cause d'un pied creux : l'insuffisance des muscles interosseux **7** laisse la prédominance aux muscles extenseurs des orteils **3** qui entraînent la première phalange en hyperextension ; de ce fait, la tête des métatarsiens se trouve abaissée **b**, ce qui réalise l'abaissement de l'avant-pied, donc le pied creux et la griffe des orteils ;
- **l'abaissement des têtes métatarsiennes** peut aussi être dû **(Fig. 74)** à une insuffisance du muscle tibial antérieur **2** : les extenseurs **3** tentent de le suppléer et entraîne la bascule des premières phalanges ; les muscles plantaires **6** non contrebalancés aggravent la courbure et le triceps **1** détermine un léger équin ; une inclinaison latérale en valgus **(Fig. 75)** est due à la prédominance du muscle long extenseur des orteils, créant un **pied creux valgus équin** ;
- une cause fréquente de pied creux est **la chaussure trop courte ou le talon haut (Fig. 76)** : les orteils butent dans le bout de la chaussure et sont redressés en hyperextension **a**, d'où abaissement des têtes métatarsiennes **b** ; sous l'influence du poids du corps **(Fig. 77)**, *le pied glisse* sur le plan incliné et *le talon se rapproche des orteils* **c**, ce qui exagère encore la courbure de la voûte.

Le diagnostic de pied creux est facilité par l'étude de l'**empreinte plantaire (Fig. 78)** : par rapport à l'empreinte normale **I**, le début de pied creux **II** se caractérise par une saillie convexe sur le bord externe **m** et par un approfondissement du « golfe » **n** du bord interne ; par la suite **III**, le fond du « golfe » rejoint le bord externe **p**, coupant l'empreinte en deux. Dans les pieds creux invétérés **IV**, aux caractéristiques précédentes s'ajoute la disparition de l'empreinte des orteils **q** due à la **griffe des orteils**.

Il faut savoir cependant qu'une empreinte de pied creux avec interruption de la bande d'appui externe peut s'observer dans le **pied plat valgus des enfants et des adolescents** : le valgus du calcanéus, l'affaissement de l'arche interne fait « décoller » légèrement l'externe, qui perd le contact avec le sol à sa partie moyenne, ce qui peut induire en erreur. Mais il est facile de reconnaître cette cause de *fausse empreinte de pied creux* : les orteils reposent tous sur le sol et en soulevant l'arche interne, ou mieux, en faisant tourner le squelette jambier en rotation externe, le pied restant posé, on voit se compléter la bande d'appui externe, tandis que l'arche interne se creuse de nouveau.

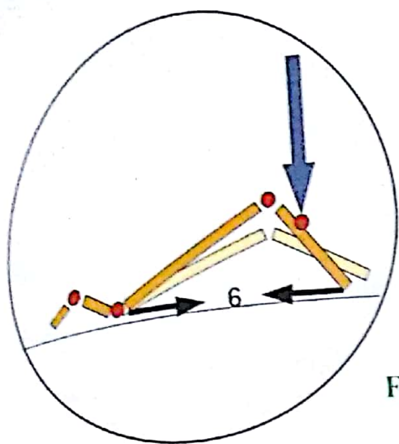


Fig. 69

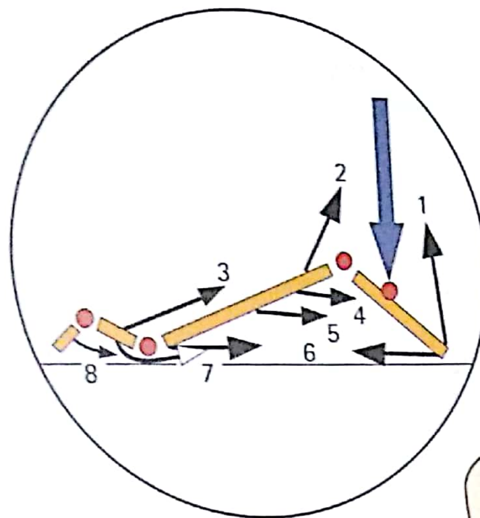


Fig. 65

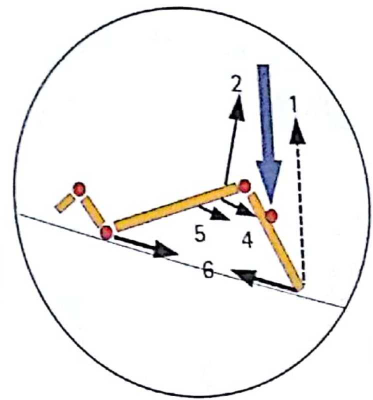


Fig. 66

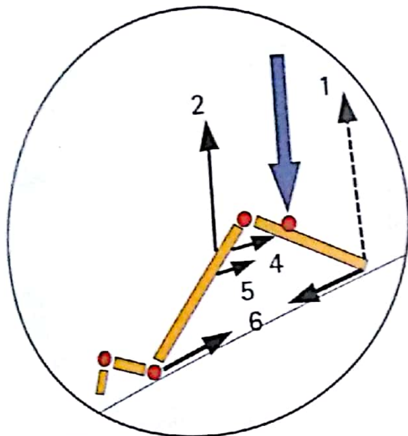


Fig. 71

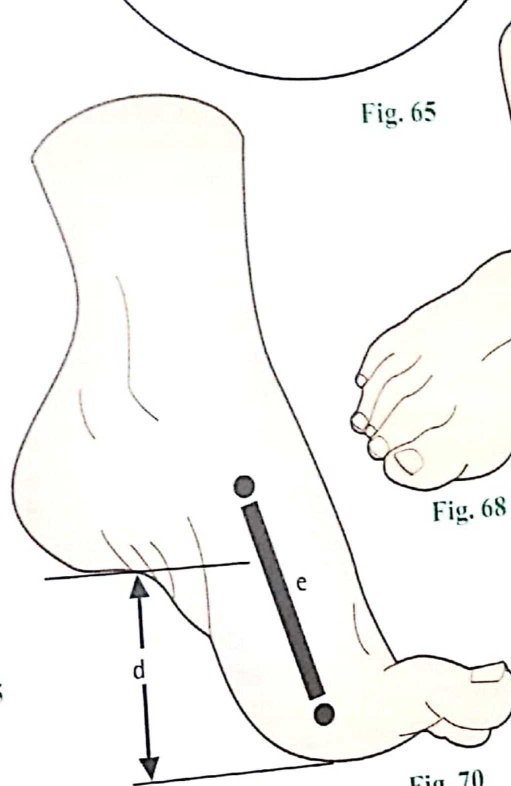


Fig. 70

Fig. 68

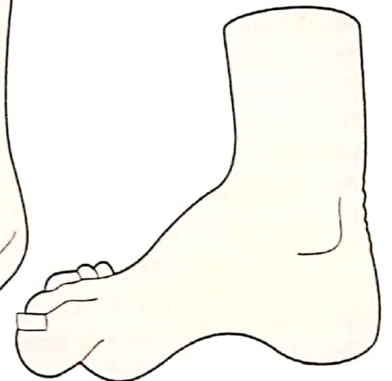


Fig. 67

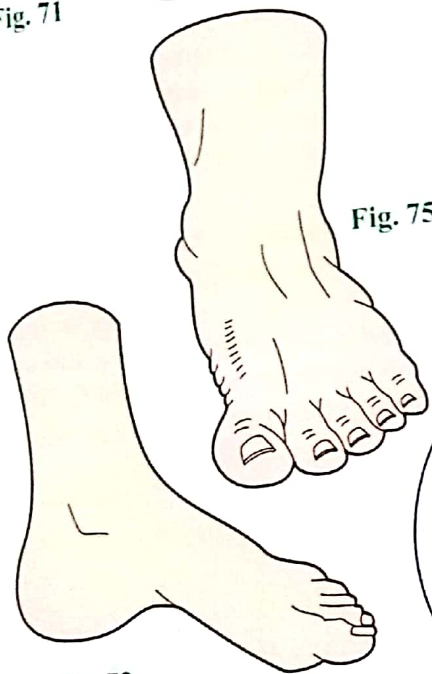


Fig. 75

Fig. 72

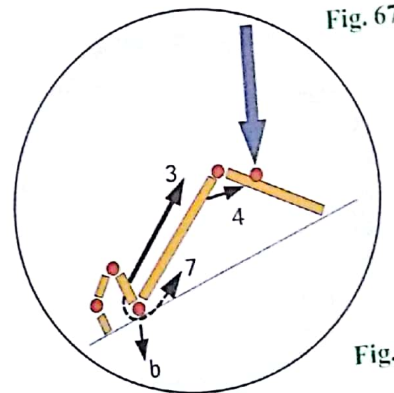


Fig. 73

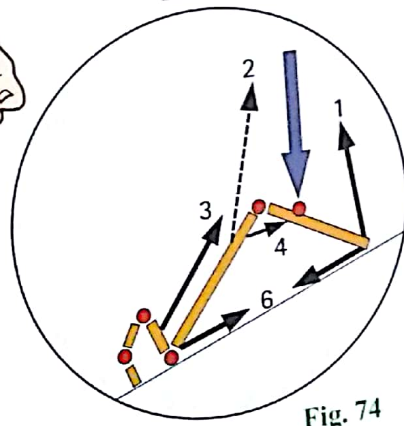


Fig. 74

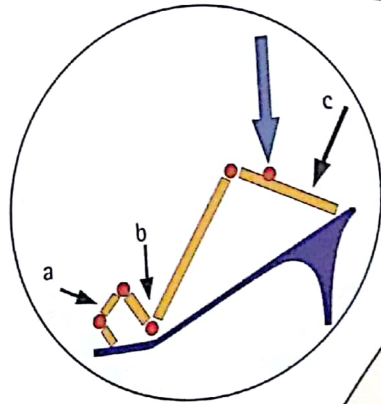


Fig. 76

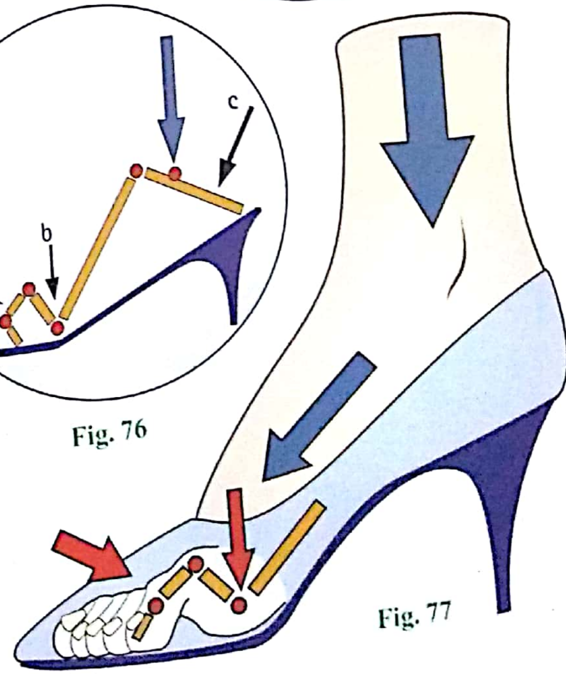


Fig. 77

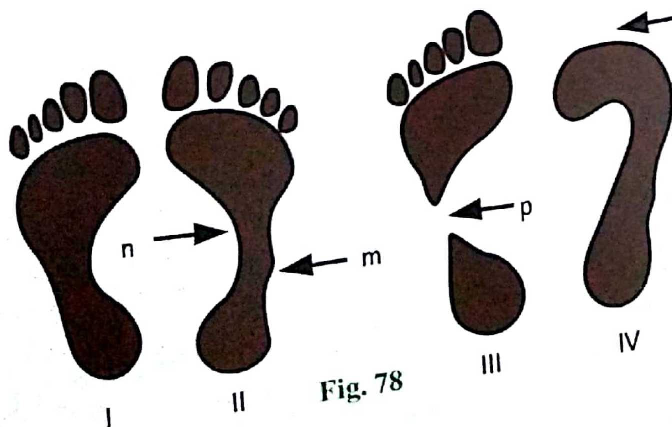


Fig. 78

Les pieds plats

L'effondrement de la voûte plantaire est dû à la **défaillance de ses moyens de soutien naturels, muscles et ligaments**. Les ligaments suffisent à eux seuls pendant une courte période à maintenir la courbure normale de la voûte, puisque l'empreinte plantaire d'une pièce d'amputation est normale, sauf si l'on sectionne les ligaments. Cependant, chez le vivant, **si les soutiens musculaires sont défaillants, les ligaments finissent par se laisser distendre et la voûte s'effondre définitivement**.

Le pied plat est donc dû avant tout à une insuffisance musculaire **(Fig. 79)**, insuffisance du muscle tibial postérieur **4** ou, plus souvent, du muscle long fibulaire **5**. Sans appui, le pied prend une **attitude en varus (Fig. 80)** puisque le muscle long fibulaire est abducteur. Par contre, dès que le poids du corps s'applique sur la voûte, *l'arche interne s'effondre* comme le montre cette figure **(Fig. 81)** où l'arche effondrée est figurée en rouge et *le pied « tourne » en valgus*. Ce valgus est dû à deux facteurs :

- la **courbure transversale de la voûte**, normalement soutenue **(Fig. 82)** par le tendon du long fibulaire **(flèche blanche)**, se laisse aplatir **(Fig. 83)** ; en même temps, l'arche interne s'abaisse : il s'ensuit un allongement de l'arche **3** et une rotation de l'avant-pied **e** sur son axe longitudinal, de telle sorte que la plante prenne contact avec le sol sur toute sa largeur avec en même temps un déjettement **d** de l'avant-pied en dehors ;
- **le calcanéus tourne en pronation (Fig. 84)** sur son axe longitudinal et tend à se « coucher » sur sa face interne. Ce valgus, visible et mesurable par l'angle que forme l'axe du talon avec le tendon calcanéen, dépasse les 5° de variation physiologique pour atteindre 20° dans certains pieds plats. Pour certains auteurs, il serait dû à une malformation des surfaces de l'articulation subtalaire et à une laxité anormale du ligament interosseux, alors que pour d'autres ces lésions seraient secondaires.

Quoi qu'il en soit, ce valgus déplace le centre de pression *vers le bord interne du pied* et *la tête du talus plonge en bas et en dedans*. Sur le bord interne du pied, on voit alors apparaître plus ou moins nettement **trois saillies (Fig. 83)** :

- la malléole médiale anormalement saillante **a** ;
- la partie interne de la tête du talus **b** ;
- le tubercule du scaphoïde **c**.

La saillie du tubercule du scaphoïde marque le sommet de l'angle ouvert en dehors que forment ensemble l'axe de l'arrière-pied et celui de l'avant-pied : *l'adduction-pronation de l'arrière-pied est compensée par une abduction-supination de l'avant-pied* ; il s'ensuit une **disparition de la voûte** dont le mécanisme a été mis en évidence par les auteurs classiques (Hohmann, Boehler, Hauser, Delchef, Soeur).

Cet ensemble de déformation a déjà été décrit, bien qu'en moins accusé, à l'occasion des *efforts statiques appliqués sur la voûte* (Fig. 41 p. 243). Il réalise une affection relativement répandue, connue sous le nom de **pied plat valgus douloureux** ou **tarsalgie des adolescents** qui se reconnaît sur une vue postérieure du pied **(Fig. 84)** par une déviation en dehors **F**, en valgus, du calcanéus.

Le diagnostic de pied plat est facilité par l'étude de l'empreinte plantaire **(Fig. 85)**. La réalisation de l'empreinte plantaire est aisée : il suffit de poser le pied mouillé sur un sol sec et foncé. Par rapport à l'empreinte normale **I**, au cours de l'*évolution du pied plat*, on assiste à un comblement progressif du golfe interne **II** et **III**, et le bord interne finit même par devenir convexe **IV** dans les pieds plats invétérés.


Fig. 82

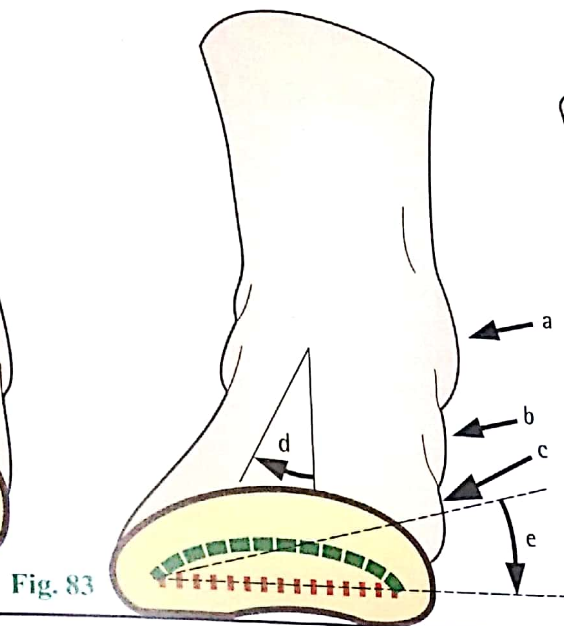


Fig. 83

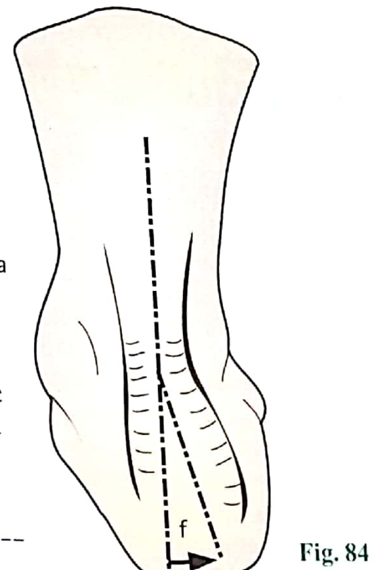


Fig. 84

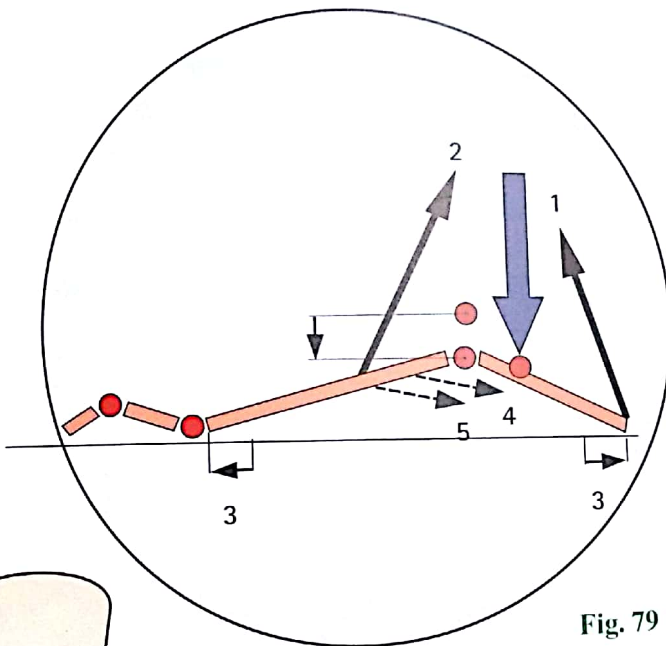


Fig. 79

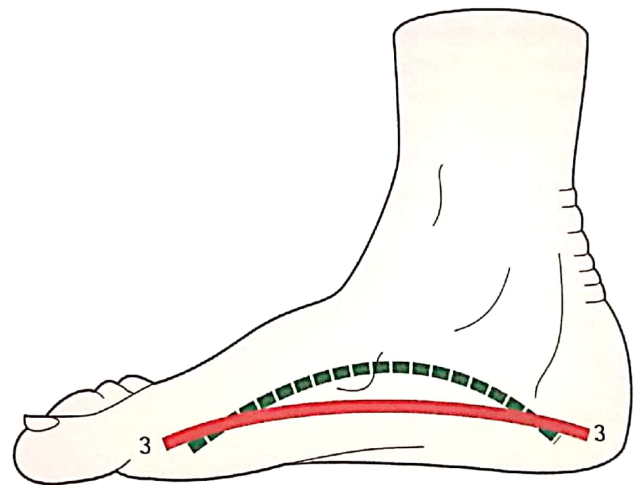
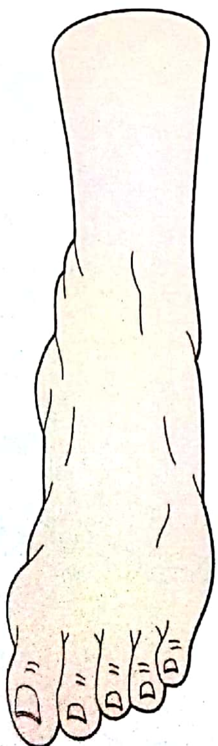


Fig. 81


Fig. 80

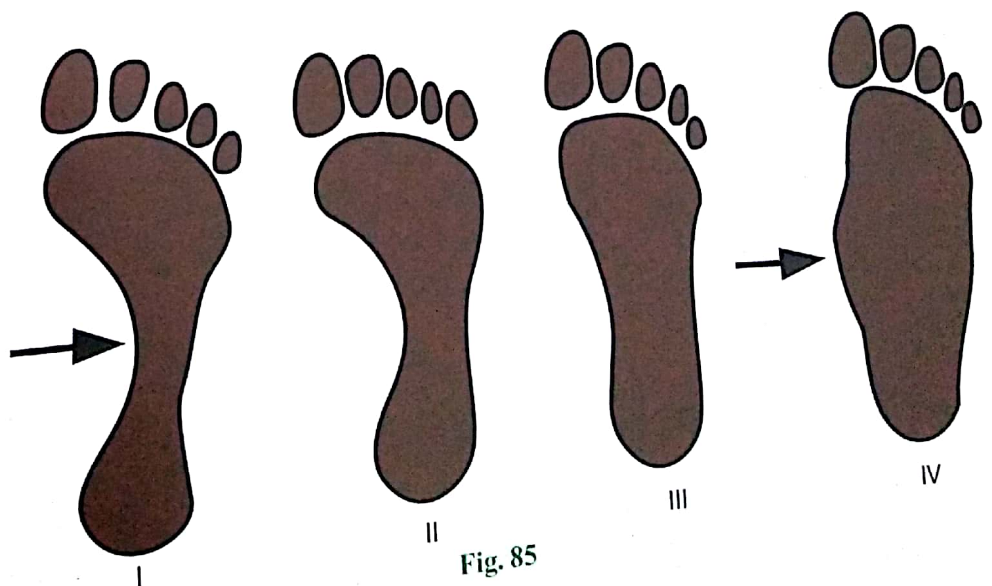


Fig. 85

Les déséquilibres de l'arche antérieure

Au cours des déformations de la voûte plantaire, l'arche antérieure peut se trouver **déséquilibrée dans ses appuis** ou **déformée dans sa courbure**.

Le **déséquilibre** est, en général, secondaire à un pied creux antérieur. Sur l'avant-pied, l'équin accroît les pressions supportées par l'arche antérieure suivant trois possibilités.

- **L'équin de l'avant-pied est symétrique (Fig. 86 : coupe au niveau des métatarsiens)** sans pronation, ni supination et la courbure de l'arche est conservée ; il existe donc une surcharge des deux points d'appui créant un durillon sous la tête des premier et cinquième métatarsiens **(flèches)**.
- **L'équin de l'avant-pied s'accompagne d'une pronation (Fig. 87)** due à l'abaissement prédominant du rayon interne par contracture du muscle tibial postérieur ou du muscle long fibulaire ; la courbure de l'arche étant conservée, la surcharge se porte sur l'appui interne de l'arche, créant un durillon sous la tête du premier métatarsien **(flèche)**.
- **L'équin de l'avant-pied s'accompagne d'une supination (Fig. 88)** ; la courbure de l'arche étant conservée, la surcharge s'effectue sur le point d'appui externe et produit un durillon sous la tête du cinquième métatasien.

La **déformation de l'arche** s'observe dans certains pieds creux antérieurs, la courbure normale de l'arche antérieure pouvant être annulée ou inversée :

- si elle est **simplement redressée ou annulée** : il s'agit d'un avant-pied plat **(Fig. 89)** ; la surcharge se répartit sur toutes les têtes métatarsiennes créant un durillon sous chaque tête métatarsienne **(flèches)** ;
- si elle est **complètement inversée (Fig. 90)** : on parle alors d'avant-pied rond ou *pied convexe antérieur* ; la surcharge se porte sur la tête des trois métatarsiens moyens et crée trois durillons très douloureux.

Ces durillons sont des **épaississements cornés** produits par une hyperpression ponctuelle, la couche superficielle de la peau étant formée de **cellules cornées**. Ils poussent souvent un **prolongement en profondeur** qui est la cause de vives douleurs dès le moindre appui. Ces durillons font la fortune des podologues qui se font fort de les éliminer à l'aide de bistouris spéciaux ou de râpes. Mais le patient est régulièrement déçu, car abraser le durillon ne supprime pas la cause, à savoir l'hyperpression… Le seul moyen de les faire disparaître définitivement consiste à **rétablir une anatomie normale de l'arche antérieure**, ce qui rétablit une répartition normale des pressions.

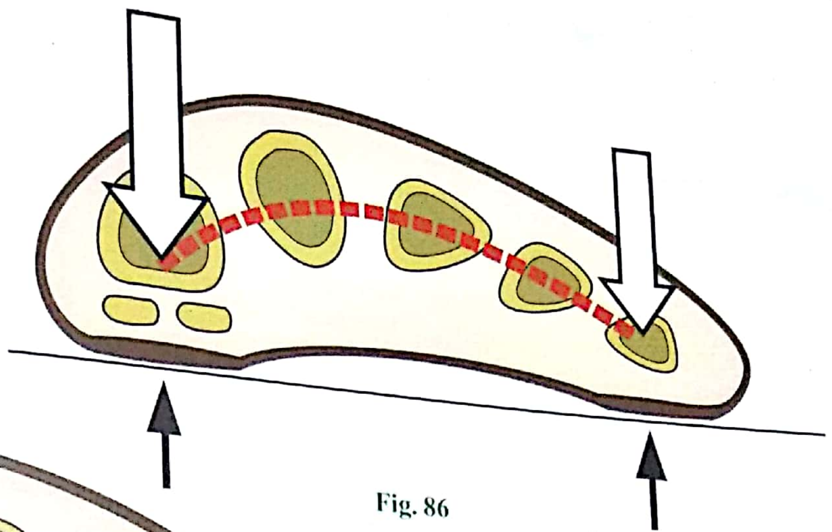


Fig. 86

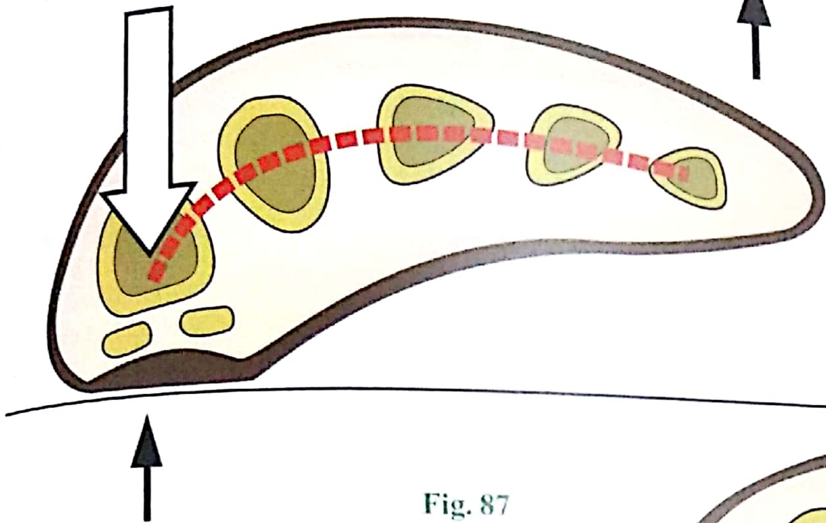


Fig. 87

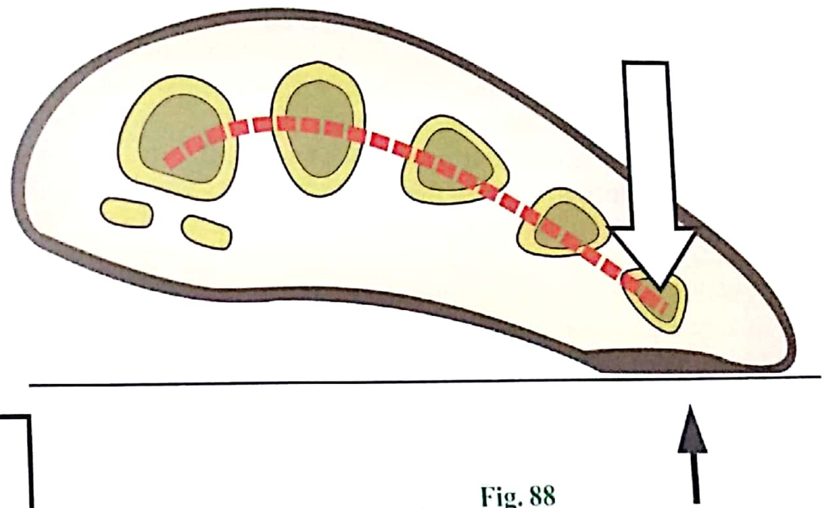


Fig. 88

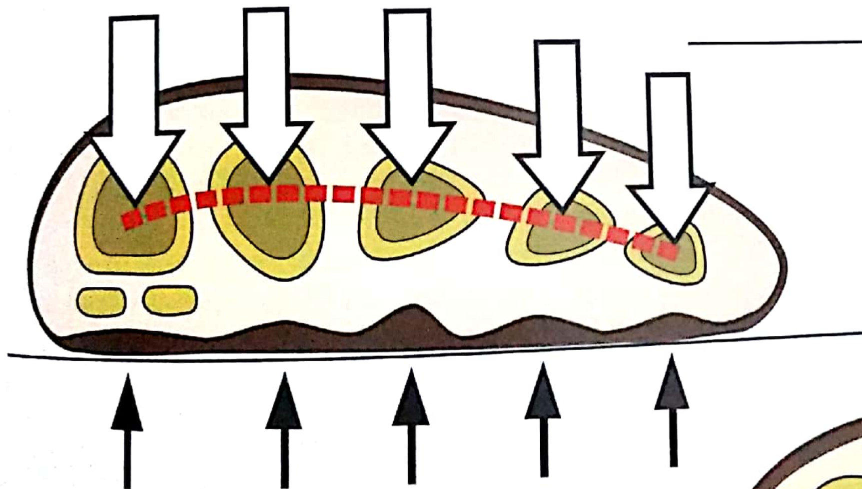


Fig. 89

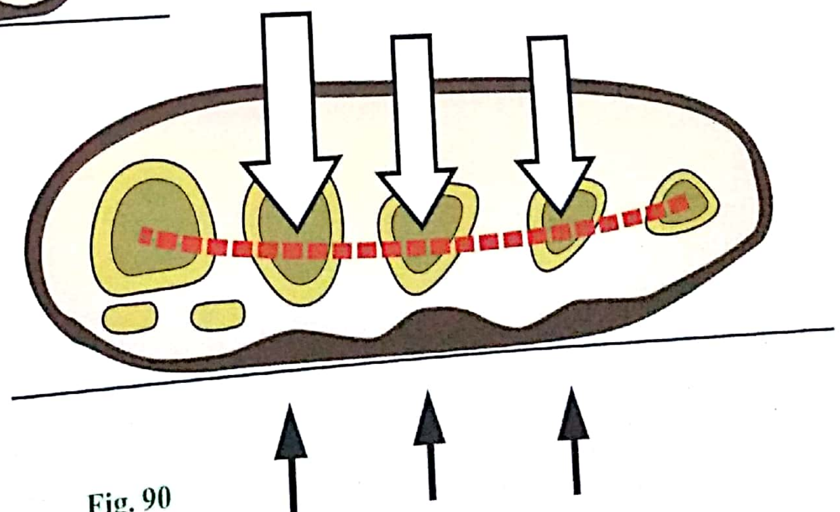


Fig. 90

Les types de pieds

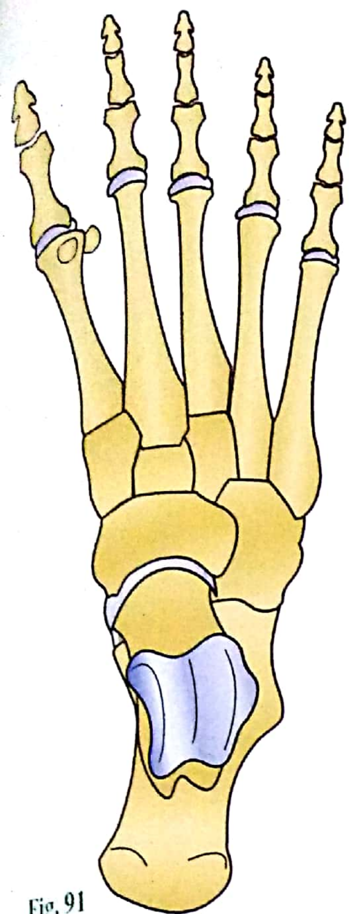
Les pieds sont certainement la partie du corps de l'homme et surtout de la femme la plus maltraitée par leur propriétaire… Chez l'homme à l'état de nature, le pied pouvait s'étaler libre et heureux, hors de toute contrainte.
Le **pied ancestral (Fig. 91 : vue squelettique)**, que les savants appellent aussi « pes anticus », en souvenir du pied préhumain à gros orteil préhenseur, pouvait prendre un large contact avec le sol, grâce à ses métatarsiens et à ses orteils largement écartés.
Lorsque la civilisation l'a enfermé dans des chaussures plus ou moins contraignantes, il a dû s'adapter. La mode intervenant, surtout en ce qui concerne les chaussures féminines à bout pointu, cette contrainte fut catastrophique **(Fig. 92 : squelette dans une chaussure à bout pointu)**. Ainsi apparut ce qui est maintenant connu sous un nom barbare d'« **hallux valgus** » :

- le premier métatarsien, très écarté du deuxième (**metatarsus varus ou adductus**), est refoulé en dedans, entraînant l'hallux dans une direction oblique en avant et en dehors **a** ;
- il s'ensuit une **saillie anormale de la tête du premier métatarsien**, au niveau de laquelle le frottement de la chaussure entraîne la formation d'une exostose **b** puis d'un durillon, communément appelé « oignon », qui peut s'infecter ;
- le deuxième métatarsien dépasse nettement les autres, ce qui reporte sur lui l'**appui en fin du pas**, d'où surcharge, articulation douloureuse à sa base et quelquefois même fracture de marche (pied forcé) ;
- le cinquième métatarsien lui-même très écarté en dehors crée un **cinquième métatarsien valgus ou abductus**. Il est refoulé en dedans **c** avec le cinquième orteil ;
- bientôt le déséquilibre devient permanent, fixé par les rétractions capsulaires, la **luxation en dehors** des sésamoïdes **d** et des tendons fléchisseurs **e**, ce qui aggrave le déséquilibre ;
- l'hallux en travers refoule les orteils médians **(Fig. 93)** et passe même au-dessous du deuxième : on dit qu'il est « **infraductus** » ;
- du côté externe, le cinquième orteil subit une déformation inverse en « **quintus varus** », ce qui diminue la place des orteils médians et entraîne leur **déformation « en marteau » (Fig. 94)** avec formation de durillons à la face dorsale de l'articulation interphalangienne proximale, dénommés « cors » ;
- la griffe des orteils médians appuie vers le bas les têtes métatarsiennes et les abaisse : ainsi l'arche antérieure est devenue convexe, c'est le « **pied convexe antérieur** ».

Au total, cette déformation très banale en « hallux valgus », avec « orteils en marteau » et « pied convexe antérieur » devient très gênante pour se chausser et ne peut être corrigée que par une **intervention chirurgicale**.
Le **type morphologique du pied** joue un grand rôle dans l'apparition de ces déformations. Par référence aux arts graphiques et plastiques, on distingue **trois variétés de pieds** :

- le **pied grec (Fig. 95)**, tel qu'on l'observe sur les statues de l'époque classique : le deuxième orteil est le plus long **x**, puis viennent l'hallux et le troisième orteil, à peu près à égalité, puis le quatrième, enfin le cinquième orteil. C'est sur ce type de pied, le plus courant, que les charges sont les mieux réparties sur l'avant-pied ;
- le **pied égyptien (Fig. 97)**, visible sur les statues des pharaons, est caractérisé par un hallux plus long **y**, les autres venant par taille et ordre décroissants. C'est le type de pied le plus « exposé » : la longueur relative de l'hallux l'oblige à s'incliner en dehors dans la chaussure (hallux valgus) et, à cause de sa surcharge lors du temps antérieur du pas, il est exposé à l'arthrose métatarso-phalangienne créant un **hallux rigidus**.
- le **pied polynésien (Fig. 97)**, ou **pied « carré »**, tel qu'on le voit sur les tableaux de Gauguin, où les orteils sont à peu près tous égaux, en tout cas les trois premiers, ne pose pas trop de problème. C'est un pied « sans histoire ».

En résumé – et ceci concerne surtout le sexe féminin – il faut éviter les chaussures trop petites, les talons hauts (ce qui équivaut à une chaussure trop petite) : les orteils butent et se replient **(Fig. 93)** ; tous les facteurs sont réunis pour l'apparition d'un hallux valgus.
Si l'on voulait dégager une morale, on pourrait dire, en paraphrasant une parole célèbre : « **La chaussure est faite pour le pied, et non le pied pour la chaussure** ».


Fig. 91

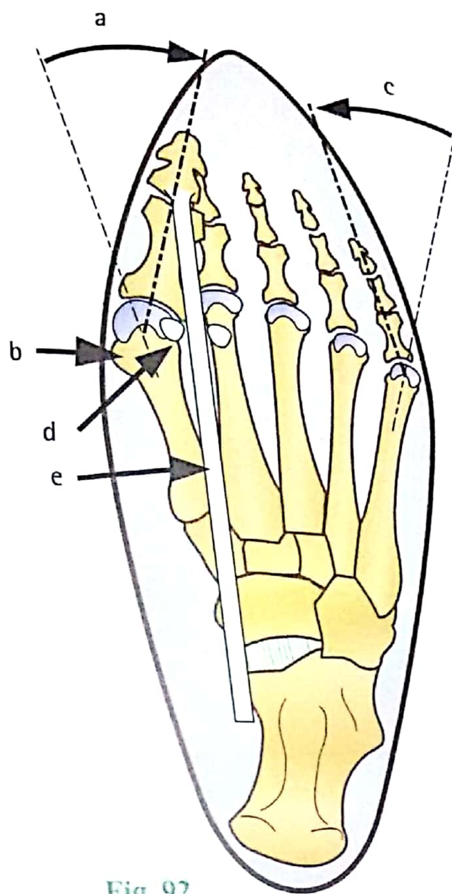


Fig. 92

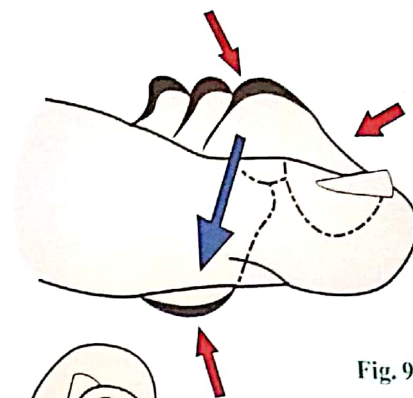

Fig. 94


Fig. 93

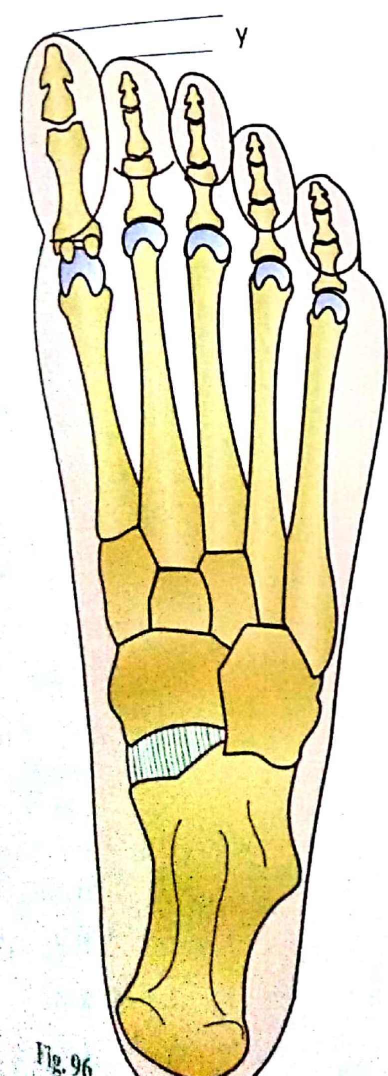


Fig. 96

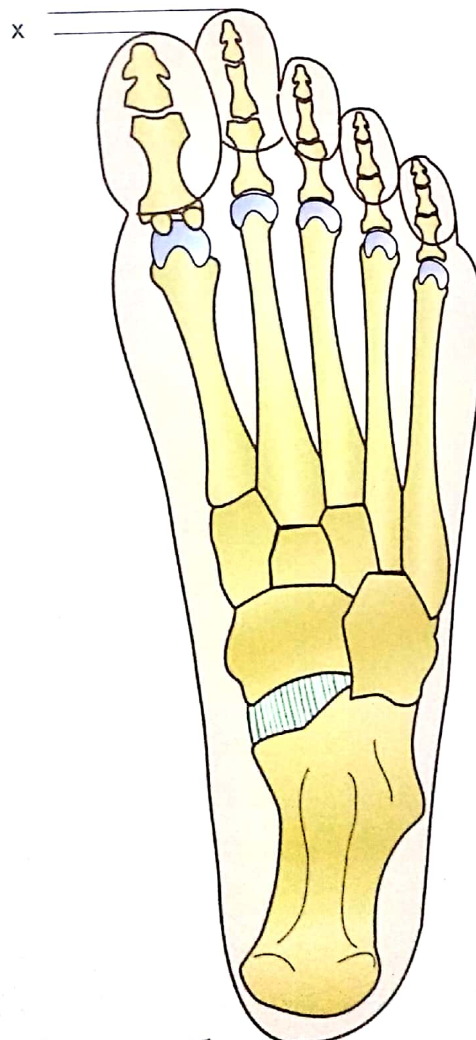


Fig. 95

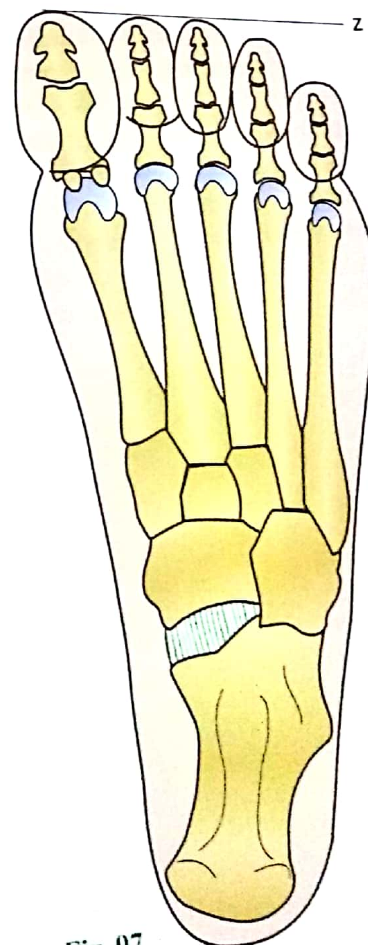


Fig. 97

Chapitre 6

LA MARCHE

Comme la parole et l'écriture, la marche bipède est le propre de l'homme (le *David* de Michel-Ange a été dessiné « en marche » : il porte sa fronde dans la main gauche). D'autres animaux peuvent se dresser sur leurs pattes arrière et faire quelques pas en position debout, mais ce n'est pas une attitude normale, même pour les singes supérieurs.

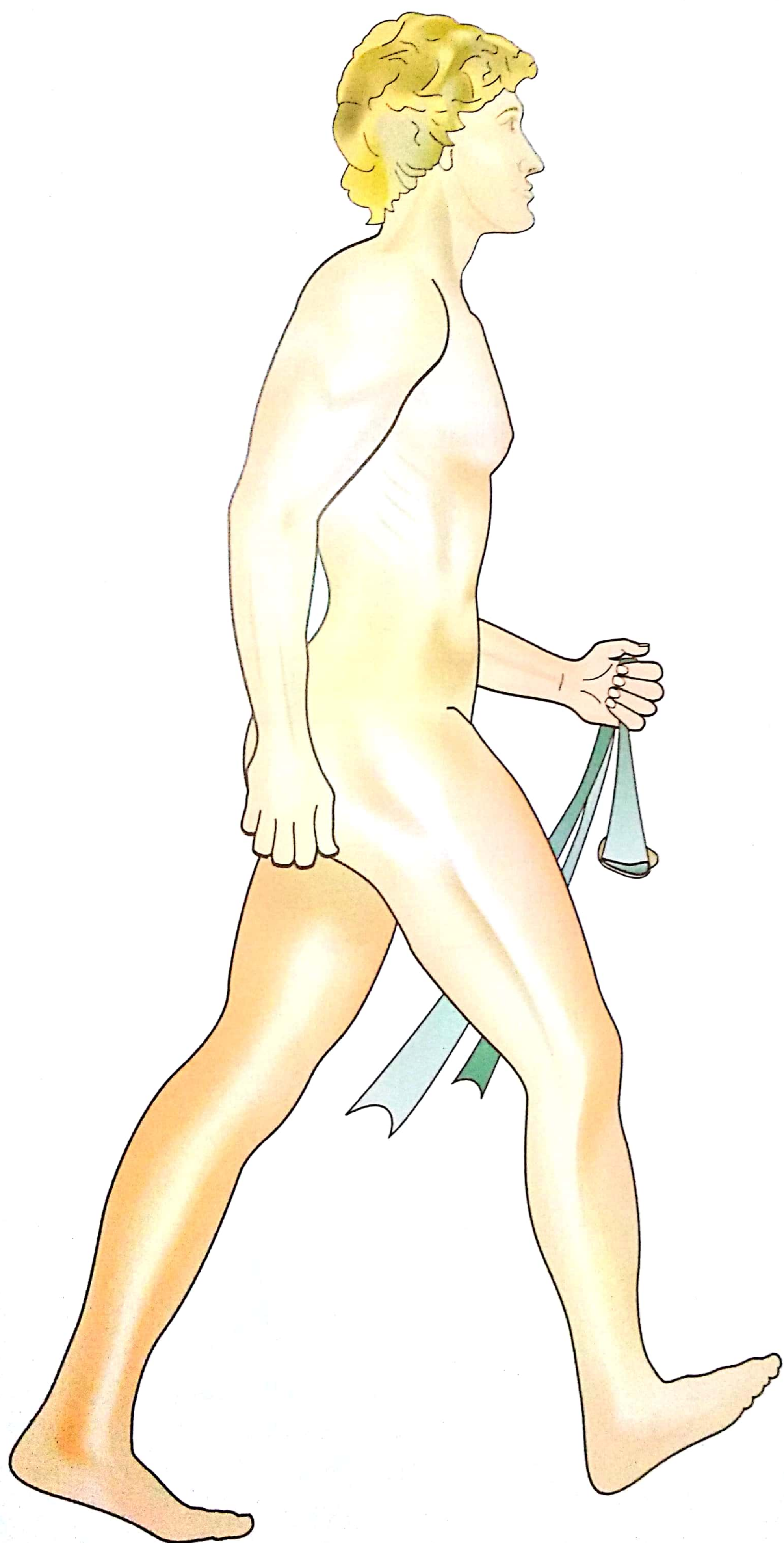
La marche bipède a permis à l'homme de coloniser la planète, grâce aussi à sa capacité à se libérer de son milieu ancestral, ce que les singes n'ont pas su faire.

Contrairement à la gazelle nouvellement née, capable dès sa naissance de courir derrière sa mère – c'est une condition de survie –, le petit de l'homme doit suivre un long et dur apprentissage de la station debout, puis de la marche, accompagné d'une multitude de chutes, heureusement sans gravité. Il lui a fallu contrôler son équilibre instable sur ses deux pieds, et ensuite *accepter la chute qui accompagne chaque pas*.

Marcher, c'est passer d'une condition statique déjà instable, la bipédie, à une position dynamique encore plus instable, compensée au dernier moment. Cela tient du miracle, perpétuellement renouvelé, grâce à la coordination réglée par le système nerveux...

La marche bipède est pour l'être humain la condition et le gage de sa liberté individuelle : sans la marche, il perd son autonomie et devient dépendant des autres.

La marche a permis à l'homme de conquérir tous les milieux, y compris les sommets les plus élevés. Grâce à son intelligence, il a su créer des moyens de déplacements supplémentaires sur terre, grâce à la roue qui n'existe pas dans la Nature, sur mer ou sous la mer et même dans les airs, en copiant les oiseaux. Il ambitionne aussi de conquérir l'espace, mais son moyen de déplacement privilégié et indispensable reste la marche et c'est là qu'on comprend le sens profond de l'énigme que le Sphinx posa à Œdipe : « Qui est celui qui marche à quatre pattes le matin, à deux pattes le midi et à trois pattes le soir »...



Le passage à la bipédie

Les lointains ancêtres de l'homme, à commencer par les tétrapodes sortis de la mer il y a trois cents millions d'années, étaient des quadrupèdes. Tous les vertébrés sont construits sur le même prototype, comportant quatre membres et marchant à l'horizontale sur leurs quatre pattes. Même les singes supérieurs se déplacent sur le sol en quadrupédie, mais leur habitat arboricole les oblige à utiliser leurs membres antérieurs pour grimper, ce qui représente le passage obligé vers la bipédie…

La transition a certainement été longue et difficile et a nécessité de profondes transformations dans la structure de l'ensemble du corps.

À partir de la position quadrupède (Fig. 1) où le rachis est dans son ensemble convexe vers le haut, le relèvement du corps (Fig. 2 et 3) se traduit par un redressement du rachis lombal (flèche 1) et une verticalisation du sacrum (flèche 2). Simultanément, le changement d'orientation de la tête pour conserver la direction horizontale du regard va entraîner une migration vers l'avant du foramen occipital (flèche 3).

La verticalisation du sacrum nécessite la bascule en rétroversion du pelvis (Fig. 4 et 5) qui oblige à une extension forcée de la hanche, ce qui met en tension ses ligaments antérieurs et entraîne un changement considérable dans la congruence de ses surfaces articulaires : la tête fémorale se trouve ainsi « découverte » en avant (voir fig. 71 p. 31).

Si les ligaments antérieurs de la hanche 1 ne s'allongent pas suffisamment (Fig. 4), la rétroversion du pelvis va être incomplète 2 et le sacrum restera incliné 3 à 45°, d'où une hyperlordose qui va retentir sur les autres courbures rachidiennes. Par contre, lorsque les ligaments antérieurs 4 s'allongent suffisamment (Fig. 5), le pelvis va compléter sa rétroversion 5 et le sacrum va se verticaliser 5, ce qui entraîne un redressement de la lordose lombaire 6 et, par conséquent, des autres courbures rachidiennes.

Ce processus a été bien étudié par A. Delmas (voir Volume III Fig. 16 p. 15) et se résume dans trois schémas (Fig. 6) : la rétroversion du pelvis est restée incomplète a et le sacrum est horizontal, ce qui entraîne une exagération des trois courbures rachidiennes : hyperlordose lombale, cyphose dorsale et lordose cervicale. À l'extrême opposé c, la rétroversion pelvienne est totale, le sacrum est vertical et les trois courbures rachidiennes sont diminuées. La position moyenne du sacrum b, incliné à 45°, la plus courante, se traduit par des courbures rachidiennes intermédiaires.

1
2

Fig. 1 Fig. 2 Fig. 3

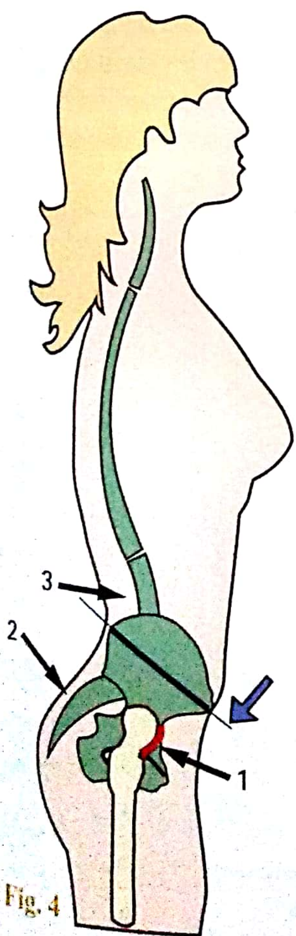


Fig. 4

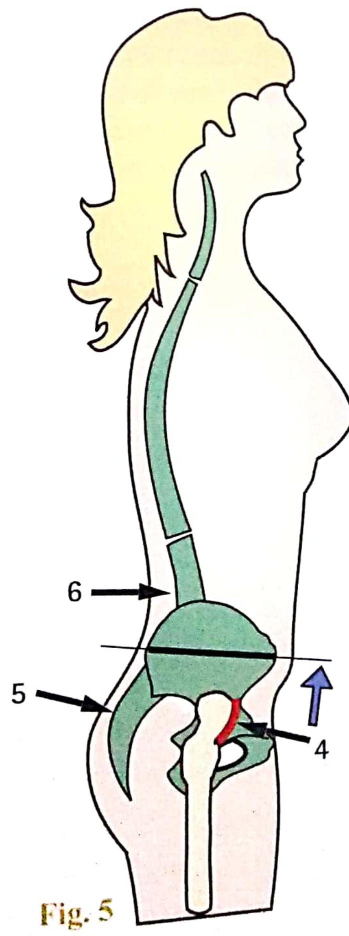


Fig. 5

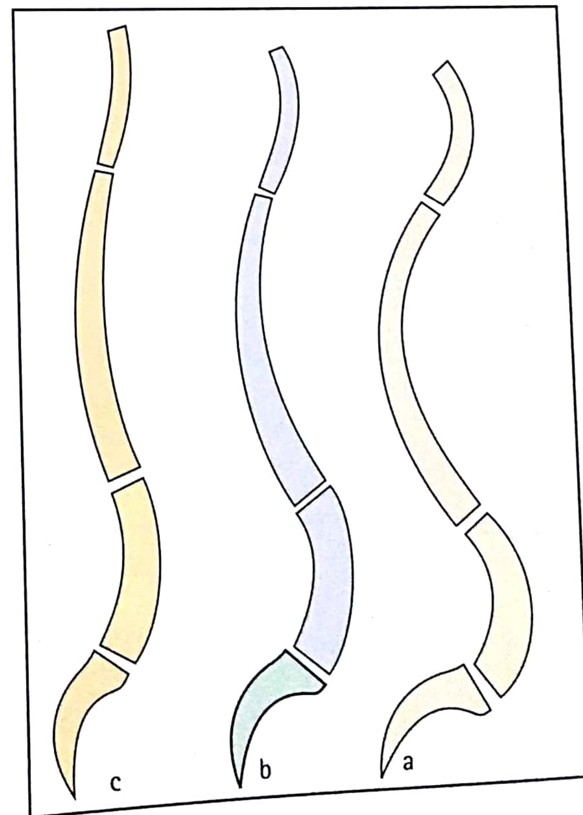


Fig. 6

Le miracle de la bipédie

Sur le plan mécanique, la position bipède est tout à fait anormale et relève du miracle permanent. En effet, le corps humain en position debout symétrique (Fig. 7 : dessin de *kouros*, tiré de l'art grec) représente un **édifice éminemment instable** pour trois raisons :

- d'abord parce que la surface de la *base d'appui est très limitée* par rapport à la hauteur de l'ensemble ;
- ensuite, parce que la *partie supérieure de l'édifice est plus large et plus volumineuse* que la partie inférieure, comme une pyramide tronquée à base supérieure ;
- enfin, parce que *sa base n'est absolument pas ancrée dans le sol* (Fig. 8) ; aucun architecte ne construirait un tel édifice, immanquablement voué à la chute.

Lorsqu'un architecte construit une tour très élevée, un gratte-ciel, il l'ancre dans le sol (Fig. 9) par de profondes fondations. L'édifice du corps humain est stable (Fig. 10) lorsque **la verticale de son centre de gravité « tombe » dans l'aire du polygone de sustentation**, matérialisé ici par le rectangle vert qui encadre les empreintes plantaires.

Le **centre de gravité** d'un volume comportant une masse est le point théorique où se trouve concentrée la *masse totale du volume*. On l'appelle aussi **barycentre**.

Chaque partie du corps possède un barycentre, comme si elle était détachée de l'ensemble : par exemple, le centre de gravité du membre supérieur (point vert) est situé un peu au-dessous du coude, celui du membre inférieur (point violet) légèrement au-dessus du genou, celui du tronc (point bleu) au niveau de l'épigastre. La position du barycentre *dépend de la géométrie du volume pesant*, et si le membre supérieur est fléchi, son centre de gravité va « sortir du volume », en avant du coude. Sur le corps en position de « garde-à-vous » le barycentre général (point rouge) est déterminé par la **composition mécanique des centres de gravité segmentaires** et se situe **dans le pelvis à la hauteur de S2-S3**, à 55 % de la hauteur totale du corps. Mais suivant les attitudes, chez un sauteur à la perche par exemple, ce centre peut subir des déplacements importants, mais le plus souvent autour d'une position moyenne, dans le pelvis. Très exceptionnellement, il peut « sortir » du volume du corps.

Cette localisation du barycentre est d'une grande importance **chez la femme** (Fig. 11 : profil féminin), car c'est dans le pelvis, autour de ce point, que se développe le fœtus, ce qui, le plus possible, lui épargne les secousses.

Sur ce schéma, on apprécie aussi l'**importance du tonus des muscles de posture**, qu'on appelle aussi **anti-gravitaires**, dans l'orthostatisme. En effet, chaque segment du corps a tendance à s'effondrer sous l'action de la pesanteur, ce qui est évité grâce aux muscles posturaux : le grand fessier 1, les muscles paravertébraux lombaires 2 et dorsaux 3, les muscles de la nuque 4, les quadriceps 5 et les triceps suraux 6.

La contraction et le tonus des ces muscles sont contrôlés en permanence par le système nerveux qui tient compte de nombreuses informations en provenance de la zone d'appui plantaire, de la position des différents segments de du corps s'intégrant dans le **schéma corporel**, de renseignement sur la **position de la tête** provenant de l'**appareil cochléaire** dans l'oreille interne et des **globes oculaires** sur la localisation de l'horizon…

C'est *grâce aux ajustements permanents de ces actions musculaires*, dans toutes les positions et dans toutes les situations dynamiques, que le corps humain peut assumer sa position bipède : sans la vigilance du système nerveux, le corps s'effondre et la bipédie est impossible.

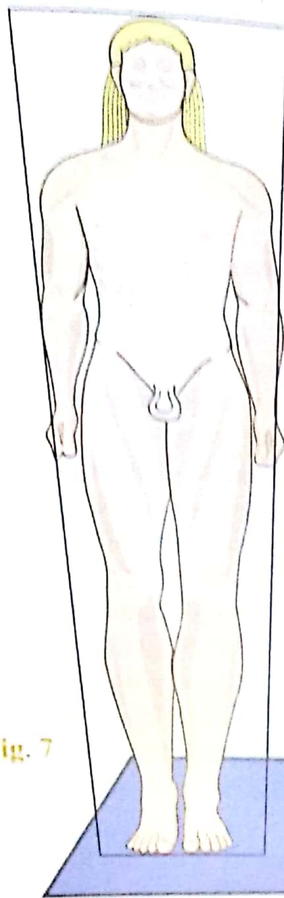


Fig. 7

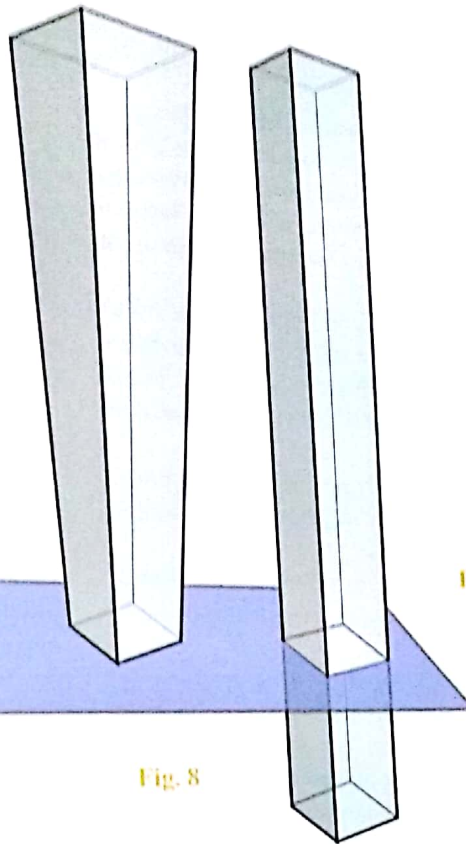
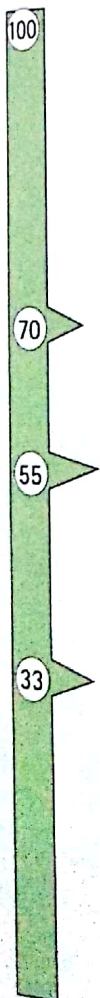


Fig. 9

Fig. 8



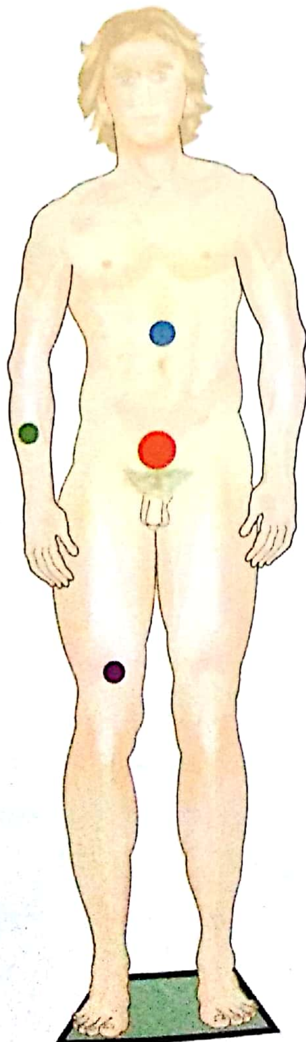


Fig. 10

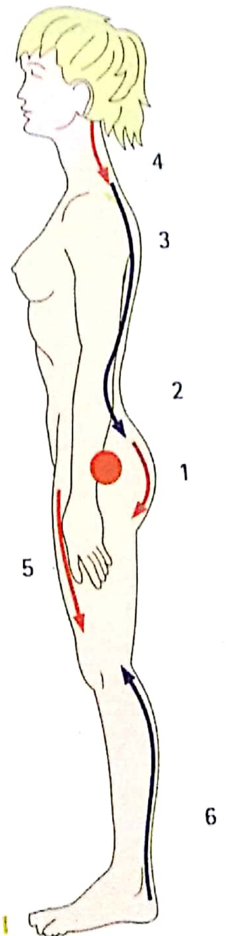


Fig. 11

Le pas initial

Il ne faut pas confondre le pas initial, avec le premier pas…

Le **premier pas**, ou **pas inaugural**, chez le jeune enfant, c'est un événement salué comme il se doit par toute la famille, car *il marque le début de toute la période de la vie bipède*, jusqu'à la maladie ou la mort qui ramèneront l'humain à sa position horizontale définitive.

Lorsque l'un des parents lâche la main de l'enfant et qu'il fait son premier pas, c'est l'histoire d'une chute, jusque-là habituelle, miraculeusement rattrapée par le « pas initial », c'est-à-dire *par le pas qui est le point de départ d'une marche ou déambulation normale.*

En effet, en position debout est symétrique, le poids du corps est réparti également sur les deux pieds, ce qui rend impossible d'en soulever un pour avancer l'autre.

Le pas initial pose donc le problème de la répartition de charge sur les pieds : il faut reporter le poids du corps sur l'un des pieds pour pouvoir soulever l'autre… !

En général, les droitiers avancent le pied droit en premier, de même que les footballeurs droitiers frappent le ballon du pied droit.

Dans ces conditions ; le **premier temps du pas initial** (Fig. 12 : vue de face) comporte le déplacement latéral du pelvis du côté du pied porteur, le gauche en l'occurrence ; grâce à la contraction des muscles adducteurs gauches 1, le pelvis se déplace vers la gauche 2, alors que, simultanément, les muscles petit et moyen fessiers gauches 3, par leur contraction, relèvent la moitié droite du pelvis 4. Ainsi, le centre de gravité se trouve-t-il déplacé vers la gauche 5, alors que le pied droit est déchargé du poids du corps.

Dans le **deuxième temps du pas initial** (Fig. 13 : vue de profil), la contraction des muscles ischio-jambiers gauches 6 propulse le pelvis en avant 7, créant un déséquilibre antérieur, amorce d'une chute vers l'avant. Ce mouvement est freiné par la contraction du muscle triceps gauche 8, qui limite la flexion de la cheville gauche. Simultanément, les fléchisseurs de la hanche droite 9 propulsent le genou droit vers l'avant et les fléchisseurs de la cheville droite 10 relèvent la pointe du pied droit déjà surélevé e.

Ce relèvement de la pointe du pied est très important, car il évite qu'elle ne butte sur le sol, ce qui gênerait son avancée et entraînerait une chute. La perte de ce relèvement, par paralysie des muscles fléchisseurs de la cheville, est connue d'un terme dérivé de l'anglais : le ***steppage***.

On constate donc que chez l'adulte, la marche commence toujours par une **chute initiale**, qui est provoquée par le pas initial : elle est le **début indispensable d'une séquence de marche**.

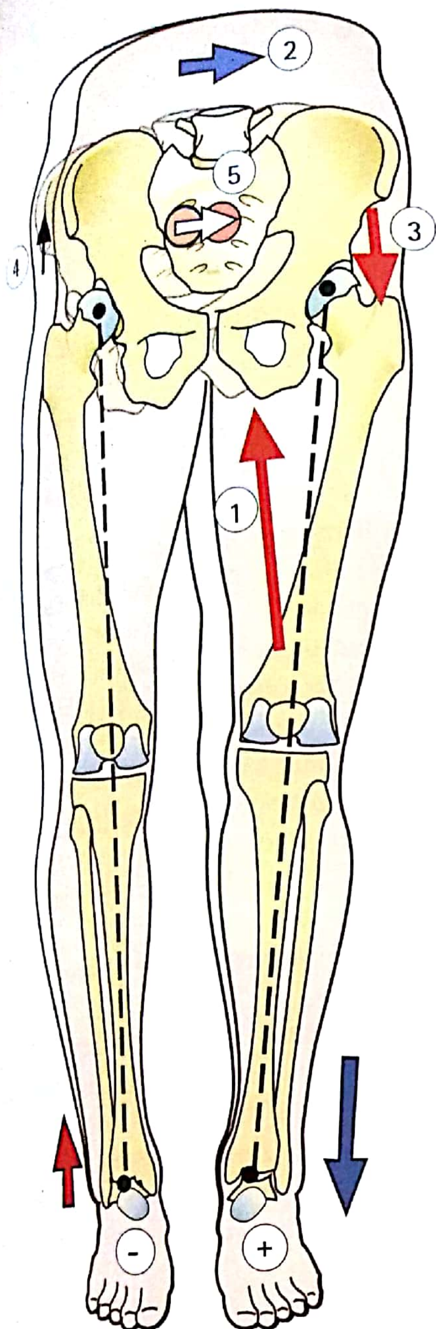


Fig. 12

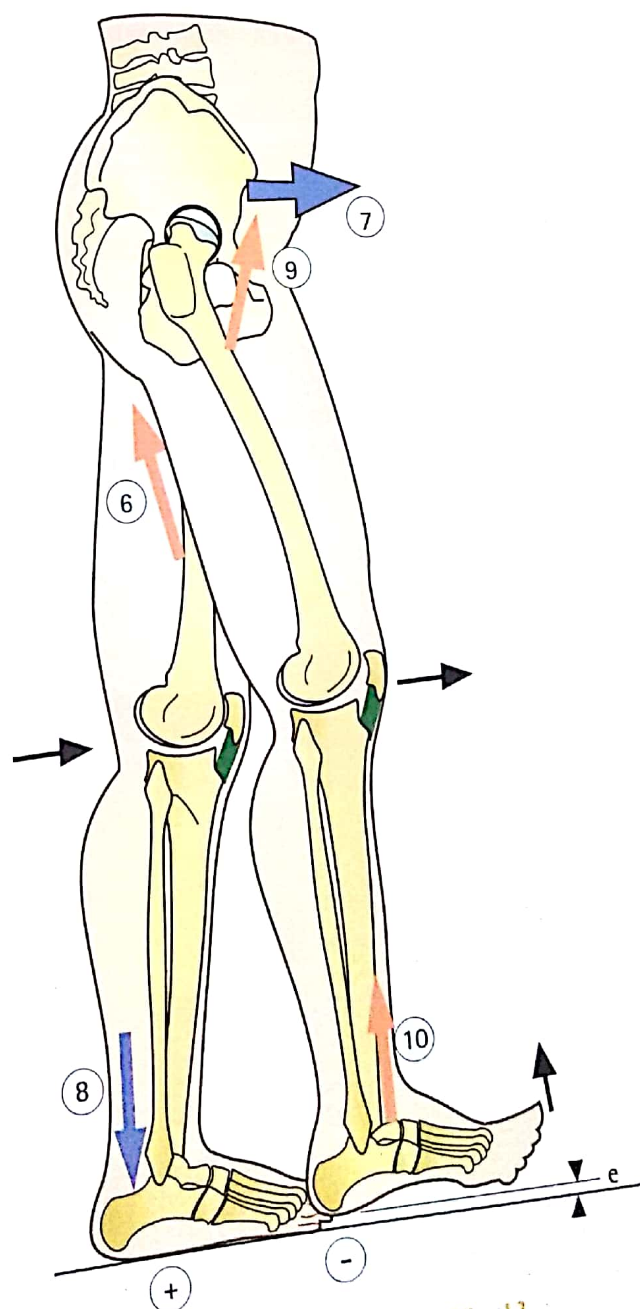


Fig. 13

Le pas oscillant

La chute en avant déclenchée par le pas initial marque le début du **temps d'appui unilatéral** du pas, pendant lequel l'autre membre inférieur va se porter en avant, pour éviter la chute : ce membre qui se porte en avant est le **membre oscillant**. C'est lui qui réalise le **pas en avant**, mécanisme essentiel de la marche...

C'est à un physiologiste français, **Étienne Jules Marey**, que revient l'honneur d'avoir le premier, à la fin du XIX[e] siècle, *décomposé les différents temps de la marche* sur un enregistrement **(Fig. 14 : graphique d'après la chronophotographie de Marey)**, grâce au « *fusil photographique* » dont il est l'inventeur et qui est le *prototype de la caméra*. Il est ainsi l'un des pionniers du cinéma et de la chronophotographie, appelée aussi **stroboscopie**...

Sur ces graphiques, les **deux temps de la marche** sont parfaitement visibles :

- le **temps unipodal** du pas porteur A, pendant lequel le membre porteur atteint le sol par le talon, puis passe d'arrière en avant tandis que le pas se déroule jusqu'à l'*impulsion motrice*, par l'extension de la cheville puis des orteils, en particulier de l'hallux ;
- durant cet appui unipodal se produit le **pas oscillant** B, au cours duquel *le membre non porteur passe d'arrière en avant*, par flexion de la hanche, *tout en se raccourcissant par flexion du genou et de la cheville*, avant de se lancer vers le sol, pour le toucher par le talon et éviter la chute, au dernier moment...
- le **temps bipodal**, *très bref, commence alors*, avant que le membre porteur postérieur ne quitte le sol, à la fin de l'impulsion motrice...

La roue n'existe pas dans la Nature, mais on peut considérer les membres inférieurs comme les rayons de **deux roues alternatives et à rayon variable** :

- le **membre porteur (Fig. 15 : diagramme du membre porteur)**, est le rayon d'une roue *qui s'allonge pendant sa rotation en appui sur le sol*, avec l'allongement ultime de l'impulsion motrice ;
- le **membre oscillant** est le rayon d'une roue *qui se raccourcit tandis qu'il est porté vers l'avant* pour redevenir porteur.

L'analyse de ce diagramme montre :

- la **première partie du temps porteur (points 1 et 2)** pendant lequel le membre porteur tourne autour du point fixe au sol, poussé vers l'avant par l'impulsion motrice. Passant à la verticale, la hanche atteint son *premier sommet* ;
- la **deuxième partie du temps porteur** où une légère flexion du membre **(point 3)** prépare l'extension du genou **(point 4)** puis de la cheville **(point 5)** qui porte la hanche à son *point culminant*.

La marche n'est ainsi qu'une succession de chutes évitées et contrôlées.

Ces deux roues alternatives n'entrent en contact avec le sol que par des surfaces limitées et l'orientation du pied, grâce à l'articulation subtalaire, lui permet de s'adapter à toutes les inclinaisons de terrain. Ces deux roues n'ont pas besoin de surfaces unies, donc pas besoin de routes, ce qui permet le déplacement de l'être humain dans les endroits les plus accidentés, et même au sommet des montagnes... !

Fig. 14

Fig. 15

Le déroulement du pas

Pendant le **temps d'appui** au sol, le pied du membre porteur effectue ce qu'il est convenu d'appeler le **déroulement du pas**, en **quatre temps**.

Ce processus est résumé sur le schéma (Fig. 16) qui superpose toutes ces phases et sur lequel on peut noter les **trois points d'appui principaux** du pied marqués par des triangles noirs :

- le **point de contact initial postérieur** où le talon touche le sol animé par toute l'énergie cinétique du corps (flèche rouge) ;
- le **point d'appui antérieur** de l'arche interne au niveau de la tête du premier métacarpien, atteint lorsque toute la plante du pied repose sur le sol (flèche verte), et qui reçoit l'impulsion motrice créée par l'extension de la cheville (flèche bleue) ;
- le **point d'appui antérieur extrême** où s'applique l'impulsion motrice due à la flexion de l'hallux (flèche jaune).

On note aussi les **trois trajectoires circulaires**, centrées sur chacun des points d'appui :

- celle de la tête du premier métatarsien, avant d'atteindre le sol ;
- celle du talon, qui se soulève du sol ;
- et celle de la tête métatarsienne, qui décolle du sol, lors de l'impulsion motrice finale.

Normalement, grâce à la **pesanteur** et aux **frottements dus aux aspérités du sol**, ces points de contact restent fixes par rapport au sol, mais si les frottements au sol diminuent, *le talon ne peut plus s'ancrer et glisse* ; c'est la chute due, par exemple au verglas. À noter que **la pesanteur joue un rôle fondamental** dans cet appui, et que, de ce fait, la marche est très perturbée par la *diminution de la pesanteur*, comme sur la lune ; elle est complètement supprimée par l'*apesanteur*, dans les cabines spatiales…

Dans le détail, l'analyse de ces quatre temps montre :

- l'**arrivée au sol du talon** (Fig. 17), freinée par le frottement au sol ; la cheville, en position de flexion, va passer en extension tandis que la plante du pied s'abat sur le sol. Ce mouvement est freiné par la contraction des muscles fléchisseurs de la cheville, en particulier le tibial antérieur Ta ;
- l'**aplatissement de la plante du pied** (Fig. 18), on peut même dire l'écrasement de la voûte plantaire qui reçoit tout le poids du corps, tandis que le membre porteur passe de sa position postérieure à l'antérieure. La flexion de la cheville est aidée par les muscles fléchisseurs. L'aplatissement de l'arche interne est amorti par la contraction des muscles plantaires ;
- La **première impulsion motrice** (Fig. 19), sous la contraction puissante du triceps (flèche bleue), tandis que les muscles plantaires résistent ;
- La **deuxième impulsion motrice** I (Fig. 20), par contraction des muscles fléchisseurs des orteils, et spécialement de l'hallux f, tandis que le triceps t continue sa contraction.

Là encore, l'efficacité de l'impulsion motrice O dépend de la pesanteur et des frottements au sol : l'impulsion motrice est diminuée ou annulée en cas de sol glissant.

Fig. 16

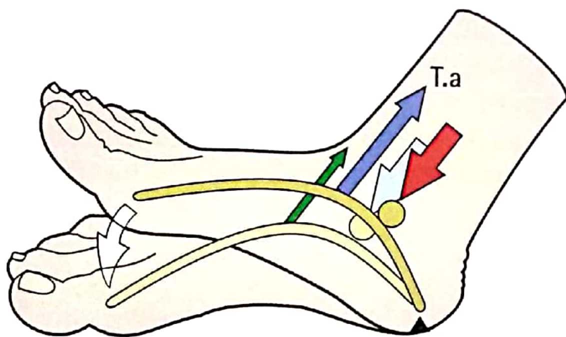
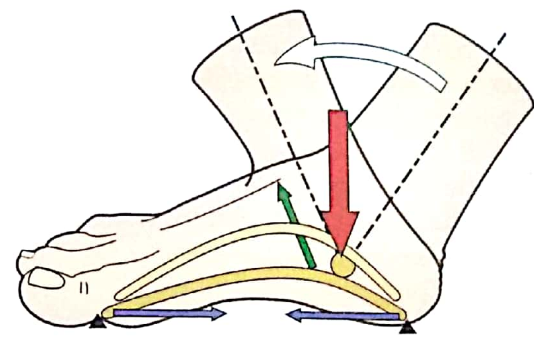


Fig. 17


Fig. 18

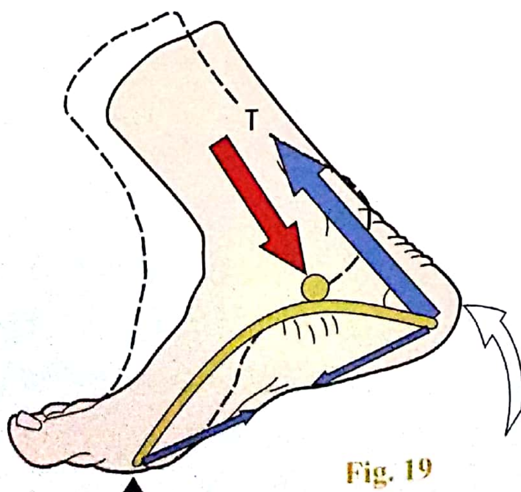


Fig. 19

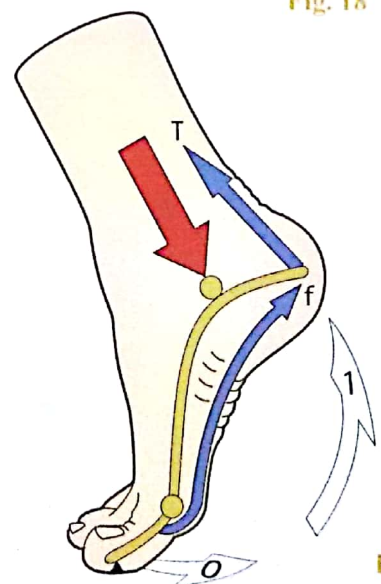


Fig. 20

Les pas

Les pas sont bien visibles lorsqu'on marche, les pieds mouillés sur un sol sec, ou lorsqu'on marche sur une plage ou dans la neige. Dans ce dernier cas, on peut aussi apprécier, par l'**enfoncement de l'empreinte**, le poids du sujet, et aussi la force de l'impact du talon ou de l'impulsion motrice, par le creux plus marqué en avant et en arrière de l'empreinte.
Cette **succession d'empreintes** (Fig. 21) permet de définir la marche et de relever ses caractéristiques.
Sur une **trajectoire rectiligne** R :

- le **pas complet** P se définit par l'écart entre les empreintes du même pied ;
- un **demi-pas** d-g se mesure entre l'empreinte du pied droit et celle du gauche.

Un pas complet P comprend, par conséquent, un demi-pas droit d et un demi-pas gauche g.
L'axe de chacune des empreintes plantaires forme un **angle de 15°** ouvert en dehors par rapport à la trajectoire. Ceci caractérise une marche normale, mais certains sujets marchent « les pieds en dedans »…en particulier les jeunes enfants, ce qui disparaît avec la croissance.
La **marche en courbe** C est obtenue par la *rotation de la totalité des membres inférieurs au niveau de la hanche*. Dans ce schéma, l'inflexion de la trajectoire vers la droite est commencée par l'action des muscles rotateurs externes de la hanche droite, qui détermine la rotation externe du pied droit (empreinte verte). Si le tournant à droite continue, c'est cette fois-ci une rotation interne de la hanche gauche qui produit la rotation interne du pied gauche. En deux demi-pas, la **rotation totale** r est mesurée par l'*addition des rotations* externe droite et interne gauche, qui est produite au niveau des hanches.

Les **caractéristiques du pas** sont propres à chaque individu. La **longueur du pas** dépend, à l'évidence, de la taille du sujet, qui détermine la longueur des membres inférieurs, mais aussi de la personnalité : chacun marche de façon différente, et certains pas peuvent être reconnaissables à l'oreille. De même, une boiterie qui entraîne une inégalité entre le pas droit et le gauche s'entend parfois mieux qu'elle ne se voit.
L'**écartement des empreintes** par rapport à l'axe de la trajectoire est normalement est de 10 à 15 cm, mais certains sujets ayant des troubles de l'équilibre, ou en état d'ivresse, écartent les pas pour *augmenter le polygone de sustentation*. Certaines marches sont artificielles, comme dans les défilés de mode, où les pas se situent sur la trajectoire elle-même.
Les empreintes plantaires illustrent le **déroulement du pas** (**Fig. 22 : chaque colonne correspond à un temps du déroulement**) :

- la surface arrondie postérieure a correspond à l'impact du talon sur le sol ;
- ensuite, la plante repose sur toute sa surface b, et même les orteils sont marqués ;
- la première impulsion motrice c révèle l'appui de l'avant-pied et des orteils ;
- elle se prolonge dans la deuxième impulsion motrice d, celle des orteils, essentiellement du côté interne, en raison de l'orientation en éversion de l'avant-pied ;
- elle se termine par l'impulsion finale du gros orteil e.

Cette analyse des empreintes plantaires est très instructive dans les troubles de la marche pour déceler les insuffisances musculaires.

R

C

r

g

P

d

Fig. 21

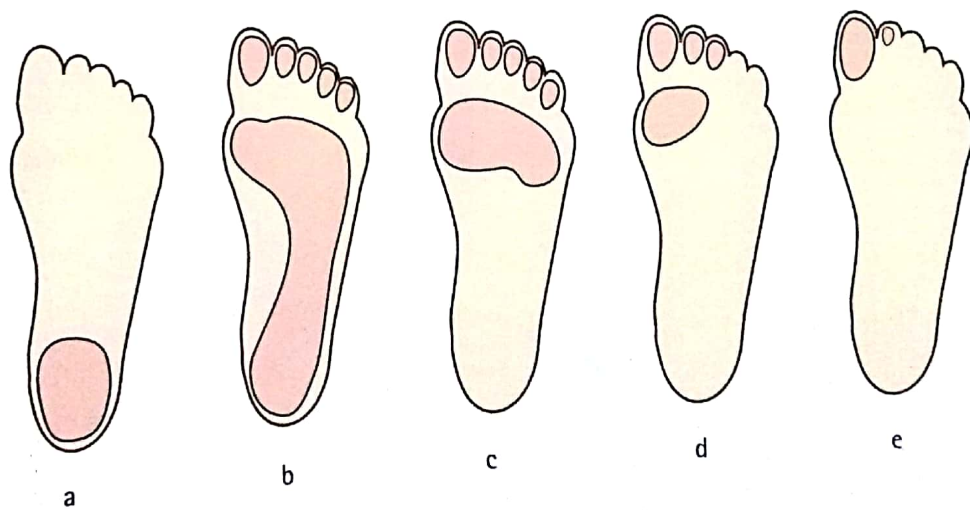


Fig. 22

Les oscillations du pelvis

Les mouvements des membres inférieurs au cours de la marche se traduisent obligatoirement par des **oscillations du pelvis**. Il est maintenant possible, grâce à la télémétrie, de connaître de façon très précise les trajectoires du corps lors de la marche, en particulier du pelvis et du barycentre général du corps.

Le pelvis subi des oscillations dans les **deux plans** (Fig. 23 : graphique à trois dimensions dans un volume parallélépipédique) et les courbes traduisent les composantes des mouvements du centre de gravité :

- **oscillations latérales** (courbe bleue) dans le plan horizontal ;
- **oscillations verticales** (courbe rouge) dans le plan sagittal.

Pour obtenir un effet visuel, ces courbes ont été matérialisées dans un volume parallélépipédique contenant les deux plans de référence : le plan horizontal (jaune clair) et le plan vertical (bleu clair) :

- dans le **plan horizontal**, lors de chaque demi-pas, le pelvis se déplace *vers le côté porteur* de 2 à 2,5 cm, ce qui représente donc deux oscillations de 4 à 5 cm d'amplitude totale par pas complet (courbe bleue) ;
- dans le **plan vertical**, le pelvis est au maximum de sa hauteur, de son altitude, dirons-nous, lors du *passage du membre porteur à la verticale*, et à son minimum lors de la phase oscillante : il y a donc un maximum et un minimum pour chaque demi-pas, ce qui veut dire que dans le plan vertical **la fréquence d'oscillation est le double de celle dans le plan horizontal** ;
- l'**amplitude verticale** de cette courbe est de l'ordre de 5 cm entre les points haut et bas.

Si l'on tente d'établir une **courbe réelle des déplacements du centre de gravité** (Fig. 24), en tenant compte des deux composantes horizontale et verticale, on obtient une **courbe résultante** (bleu foncé) figurée dans le même volume.

On peut essayer de représenter dans l'espace ces ondulations du pelvis :

- d'abord dans le **plan vertical** (Fig. 25) : dans la partie gauche du schéma ont été représentées les oscillations du pelvis au cours d'un pas complet, mais pour rendre ces oscillations plus claires, *la partie de droite les représente sur deux pas complets* en supprimant une position sur trois ;
- ensuite dans le **plan horizontal** (Fig. 26), ce qui est plus clair, car les oscillations sont deux fois moins fréquentes. Le pelvis est figuré dans trois positions : pas droit d, pas gauche g, pas droit d.

Ceci ne représente pas l'intégralité des mouvements du pelvis, car, outre ces translations horizontales et verticales, il subit encore deux types de rotation, l'une autour d'un axe vertical, l'autre autour d'un axe antéro-postérieur, comme nous le verrons plus loin.

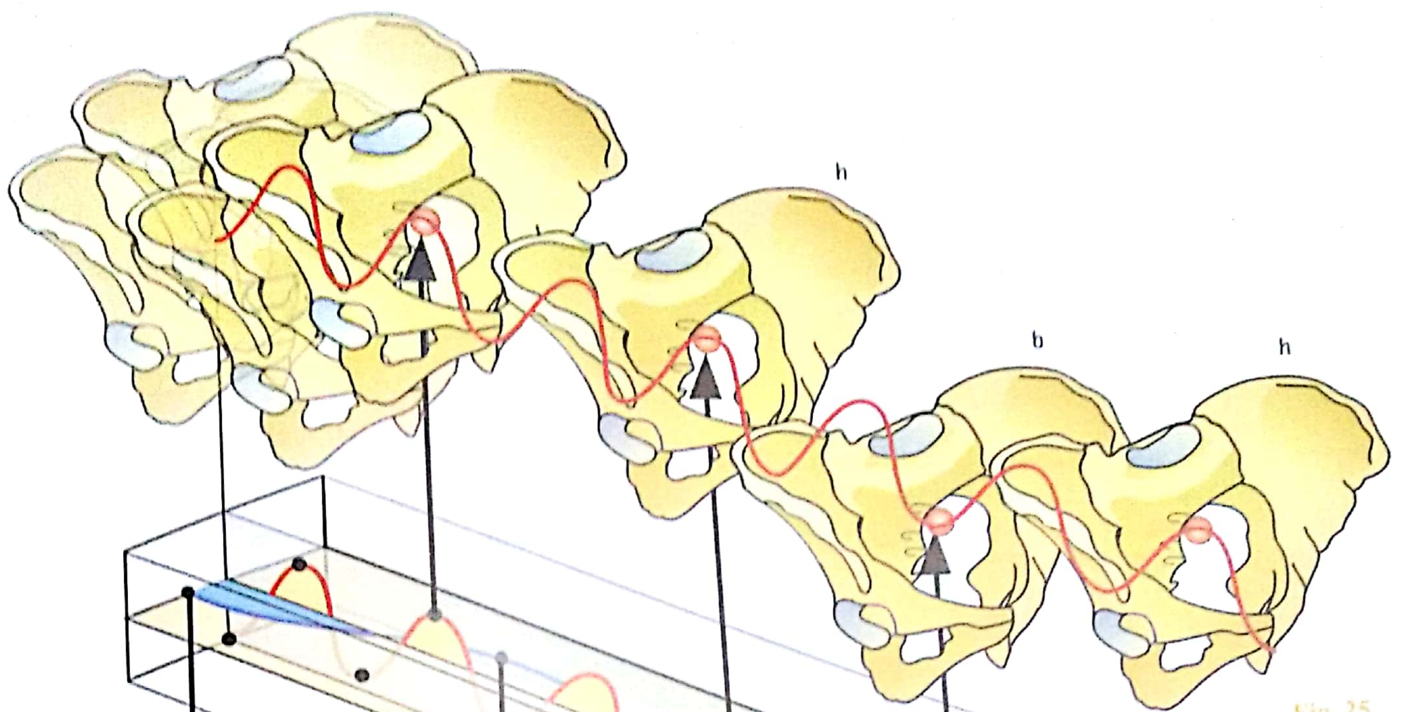


Fig. 25

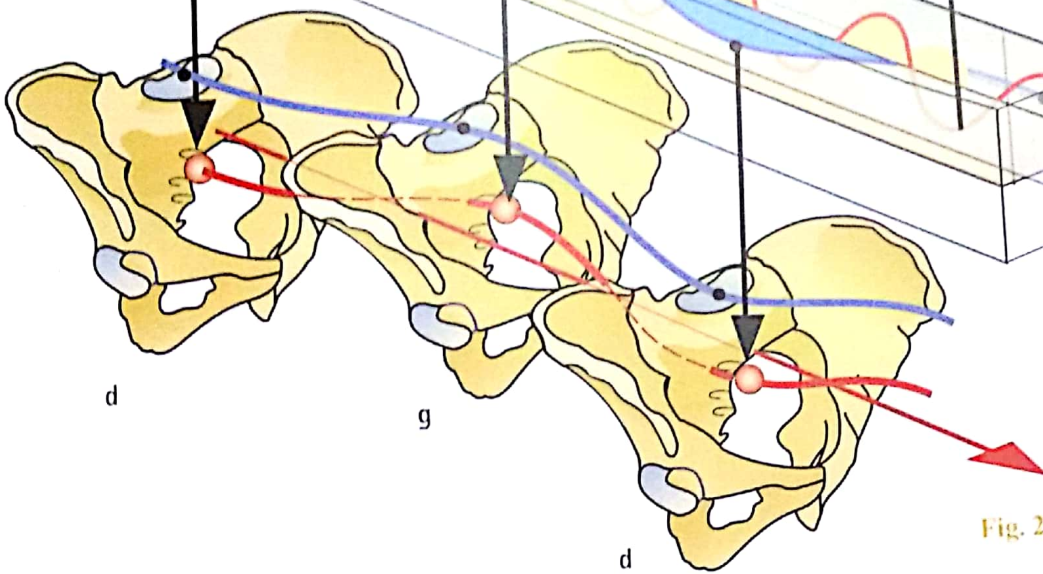


Fig. 23

Fig. 26

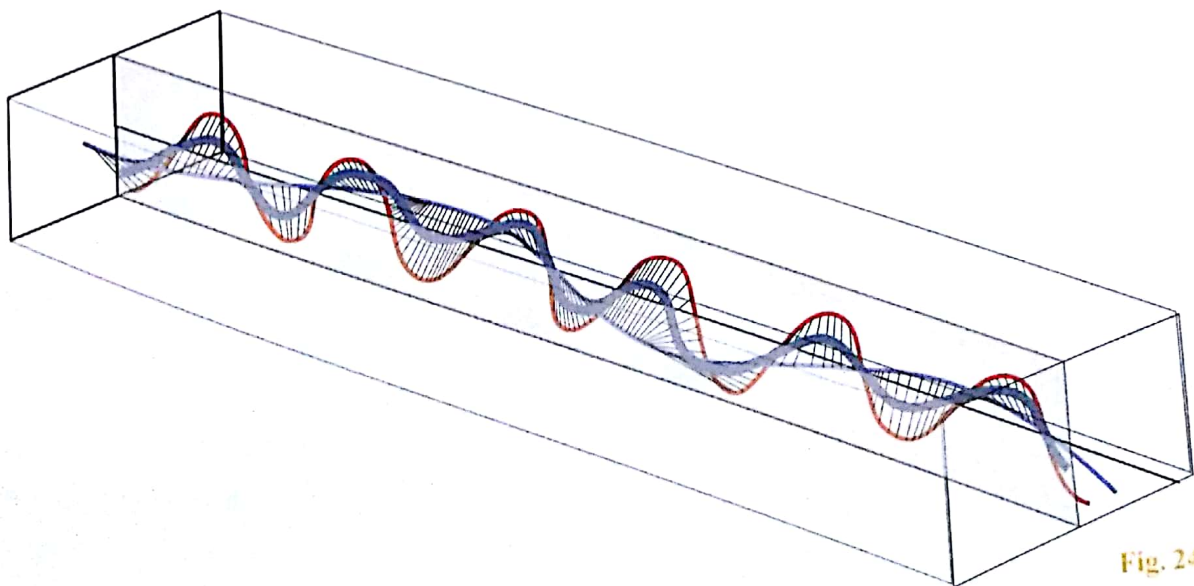


Fig. 24

Les bascules du pelvis

Les mouvements de translation latérale et verticale du pelvis sont complétés par des rotations, l'une autour d'un axe vertical, l'autre autour d'un axe antéro-postérieur,

La **rotation autour d'un axe antéro-postérieur** entraîne une bascule du pelvis, dans un mouvement qui s'apparente au roulis d'un navire (Fig. 27 : succession de pas vue de dos) : lors de l'appui unilatéral, *le côté opposé du pelvis s'abaisse*, malgré le freinage des muscles petit et moyen fessier du côté de l'appui. Ce roulis est perceptible par l'*inclinaison de la ligne joignant les deux fossettes sacrées*, qui est le **petit axe du losange de Michaelis** (voir Volume III, p. 83, Fig. 76 et 78). Cette inclinaison du sacrum vers le côté en décharge va entraîner une **inclinaison du rachis lombal**, du même coté, qui, à son tour, va retentir sur le rachis dorsal et même cervical, et provoquer une **inclinaison inverse de la ceinture scapulaire**, objectivée par l'*abaissement de la ligne des épaules du côté de l'appui.*

Au total, la ligne des épaules et la ligne du pelvis, qui sont horizontales et donc parallèles en position debout symétrique, vont adopter une **obliquité inverse** qui va déterminer une **convergence du côté de l'appui unilatéral**.

Lors d'une suite normale de pas, on voit se succéder ces bascules inverses de la ligne du pelvis et de la ligne des épaules, accompagnées des ondulations rachidiennes.

Ce phénomène est repris sur un schéma (Fig. 28) qui montre l'**évolution dans l'espace de la ligne du pelvis,** formant une sorte de ruban gondolé en fonction des bascules successives. De même, la ligne des épaules décrit dans l'espace un ruban gondolé semblable, mais avec des *inclinaisons opposées.*

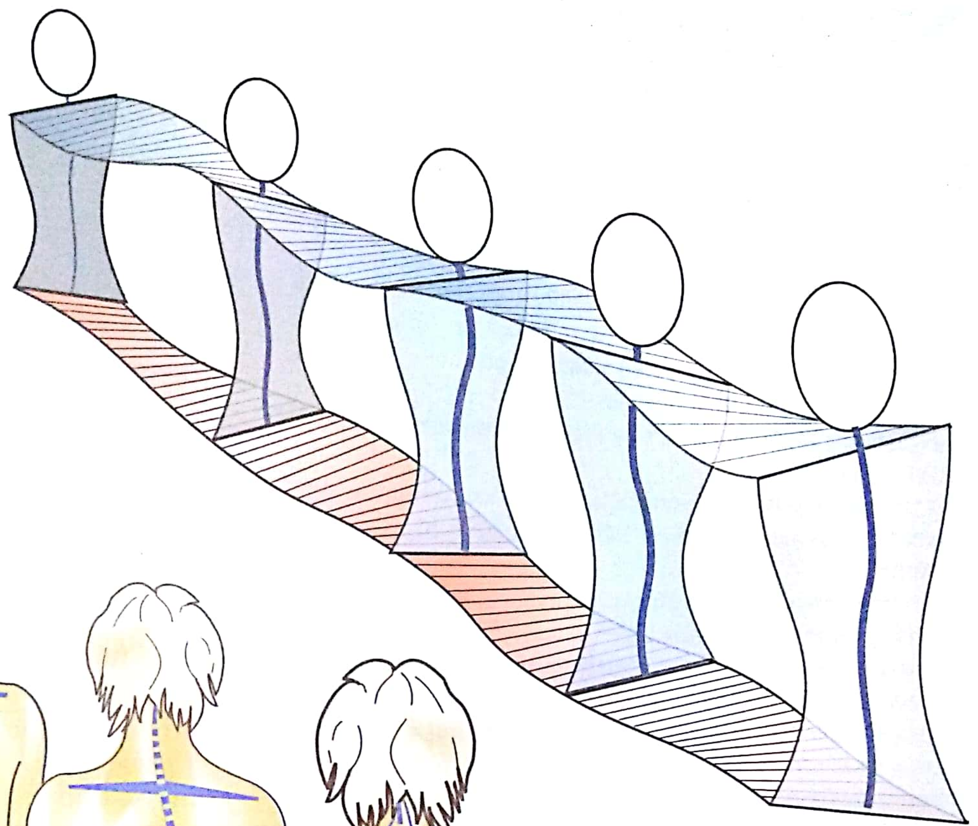


Fig. 28

Fig. 27

La torsion du tronc

À la bascule du pelvis autour d'un axe antéro-postérieur s'ajoute une **rotation autour d'un axe vertical** du fait de l'**avancée du membre oscillant** par rapport au membre porteur : dans son mouvement il entraîne le pelvis vers l'avant.
Cette rotation s'effectue **sur la tête fémorale du membre porteur** (Fig. 29) :

- on part de la position symétrique I où l'axe commun des deux hanches (en rouge) est perpendiculaire à l'axe de la marche ;
- si le membre oscillant, celui qui s'avance, est le droit, le pelvis II tourne en *rotation interne dans la hanche gauche sur la tête fémorale gauche*, tandis qu'une *rotation externe s'effectue sur la tête du fémur droit* ;
- au pas suivant III, c'est l'inverse qui se produit : le pelvis tourne en *rotation interne sur la tête fémorale droite* du membre en appui porteur, et l'avancée du membre oscillant gauche entraîne une *rotation externe sur la tête fémorale gauche*.

Simultanément, en raison du **balancement automatique des membres supérieurs** (voir page suivante), l'avancée du membre supérieur opposé au membre inférieur oscillant (Fig. 30) entraîne la ceinture scapulaire, donc la ligne des épaules dans une **obliquité inverse** :

- sur la position A, la ligne des épaules est croisée par rapport à la ligne des hanches, car le *membre supérieur gauche est en position d'avancée*, alors que le *membre inférieur droit est oscillant* ;
- sur les positions suivantes B, C et D, le croisement des lignes d'épaules et de hanches est inverse de façon alternée.

Cette **torsion du tronc** peut être schématisée (Fig. 31) en figurant les lignes des hanches et des épaules, réunies par un plan, tordu sur lui-même qu'on appelle un **plan gauche**, et qui ressemble à une voile latine…
Ainsi la marche met-elle en action l'ensemble du corps... Il n'y a guère que la tête qui reste relativement stable, grâce au regard fixé dans la direction du but et qui entraîne des rotations compensatrices au niveau du rachis cervical. La tête subit seulement des **oscillations verticales**, parallèles à celles du pelvis, mais amorties… Pas suffisamment toutefois pour qu'on puisse exécuter un « *travelling avant* » stable avec une caméra…

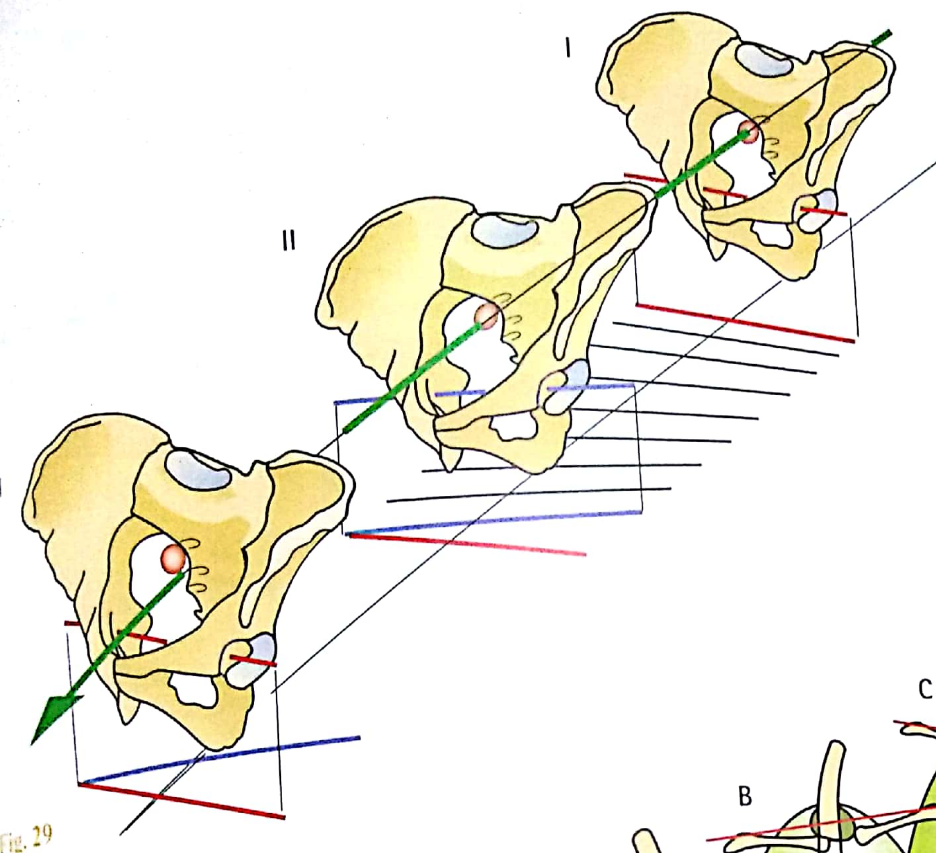


Fig. 29

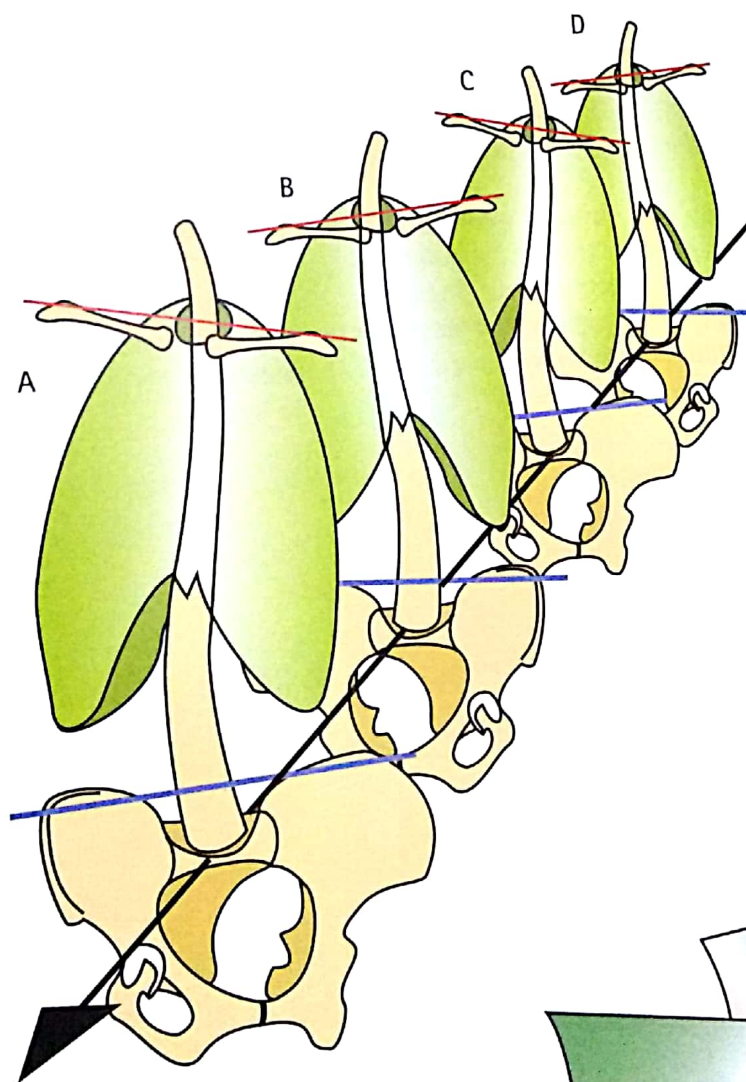


Fig. 30

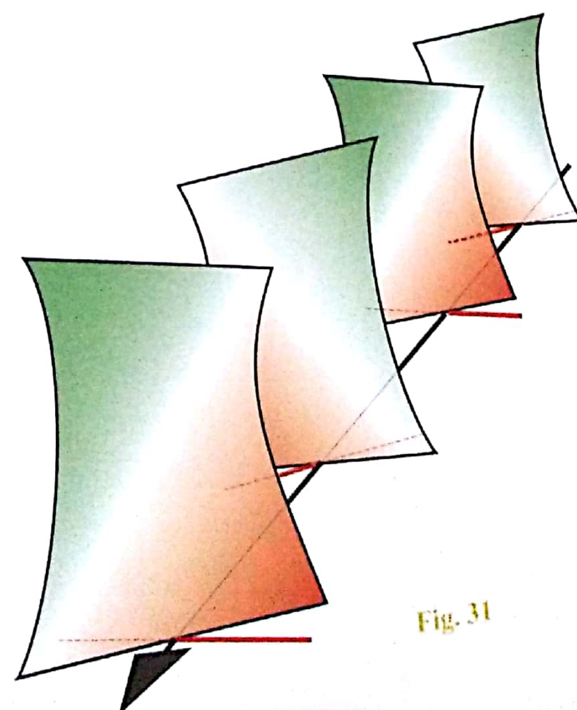


Fig. 31

Le balancement des membres supérieurs

Dans notre héritage génétique, l'homme a gardé la **marche diagonale** de ses ancêtres quadrupèdes. Tous les quadrupèdes avancent simultanément les deux pattes en diagonales, car les *deux pattes d'appui assurent ainsi une meilleure stabilité au corps*. Il n'y a guère que la girafe, le chameau, l'ours, l'okapi qui marchent « à l'amble », c'est-à-dire en avançant simultanément les deux pattes du même coté. Le cheval peut le faire, mais seulement par dressage.

La **marche humaine** comporte donc (Fig. 32 et 33) la flexion du membre supérieur opposé au membre inférieur oscillant, ce qui est illustré par ces deux schémas :

- membre supérieur gauche en même temps que la jambe droite (Fig. 32) ;
- membre supérieur droit simultanément à la jambe gauche (Fig. 33).

Ce mouvement s'effectue sans qu'on y pense et généralement le coude est plus en flexion lors de la flexion de l'épaule que lors de son extension ; dans certaines affections neurologiques, comme la maladie de Parkinson, le balancement automatique disparaît. Lors des marches militaires, ce mouvement caricatural est le résultat d'un entraînement.

Des **vues supérieures** révèlent parfaitement le **caractère diagonal de ce balancement** :

- avancée du pied droit et de la main gauche (Fig. 34) ;
- les membres supérieurs sont presque verticaux lorsque les deux membres inférieurs sont rapprochés (Fig. 35) ;
- balancement maximum, et diagonal à l'évidence, lors du **double appui** (Fig. 36) ;
- la tête, en principe, ne participe pas…

On peut se poser la question de l'utilité de ce balancement… ?

L'avancée du membre supérieur droit (Fig. 36) peut entraîner le tronc *en projetant son centre de gravité segmentaire*… mais alors, cette impulsion est-elle contre-balancée par la rétroprojection du membre supérieur gauche ?

Peut-être cette double projection inverse équilibre-t-elle la partie supérieure du corps ?

Il est un fait, cependant, c'est que **la marche est beaucoup moins aisée lorsque les deux membres supérieurs sont immobilisés** et ne peuvent se balancer, lorsqu'on porte un enfant, par exemple, ce qui expliquerait peut-être pourquoi les mères de certaines ethnies préfèrent porter leurs enfants dans le dos…

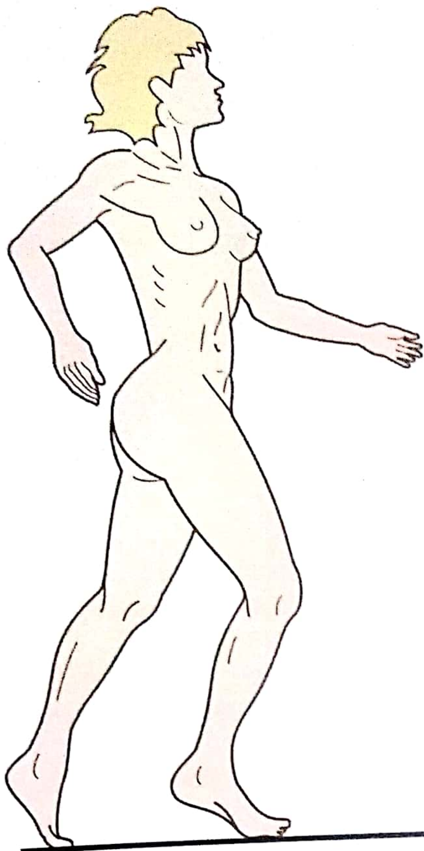


Fig. 32



Fig. 33

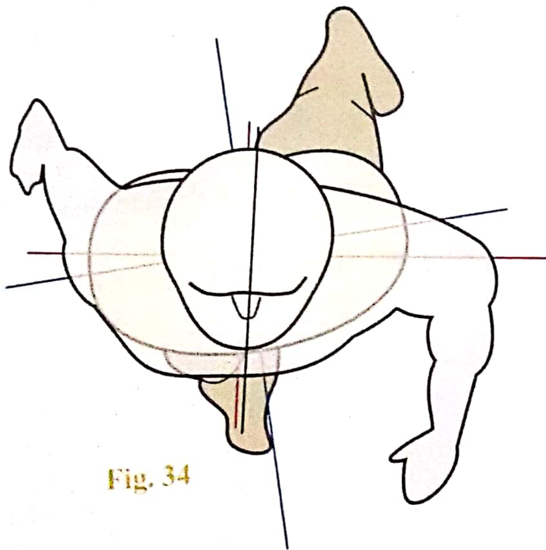


Fig. 34

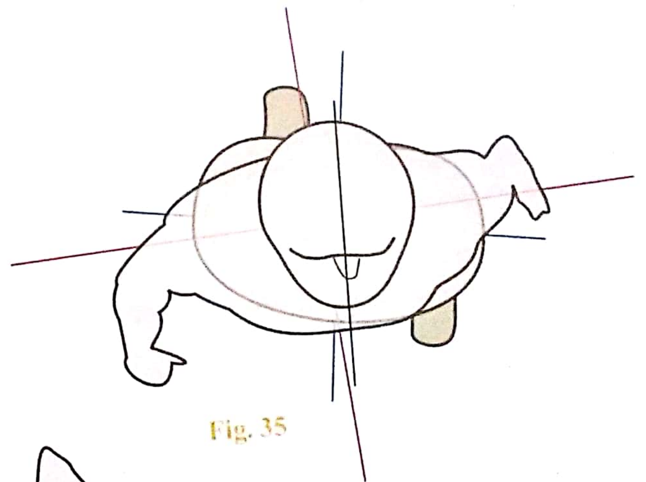


Fig. 35

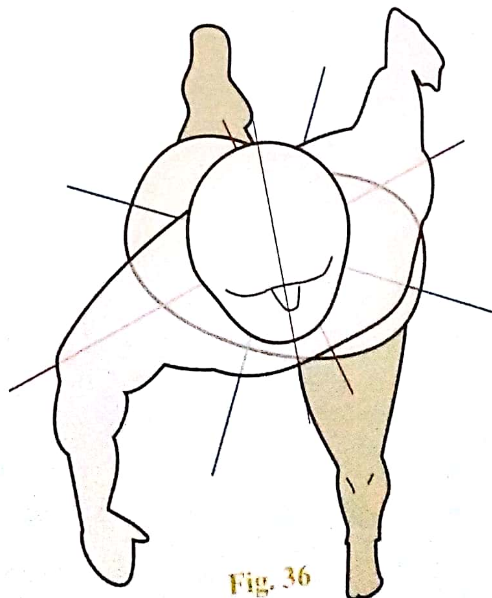


Fig. 36

Les muscles de la marche

Tous les muscles des membres inférieurs sont importants pour la marche… Ce qui signifie que la déficience d'un seul d'entre eux peut perturber la marche plus ou moins gravement.
Les neuf schémas de cette page mettent en lumière l'entrée en action successive des muscles du membre inférieur droit, le gauche figurant en référence. Ils illustrent un cycle complet, qui se répète alternativement d'un côté, puis de l'autre.

Début de l'avancée du membre oscillant (Fig. 37)

- Flexion de la hanche par le muscle ilio-psoas 1.
- Flexion du genou par les muscles ischio jambiers et le biceps fémoral 2.
- Flexion de la cheville par le groupe des muscles fléchisseurs de la cheville 3 : tibial antérieur, troisième fibulaire.
- Extension des orteils par les muscles extenseur commun et extenseur propre 4.

Contact initial avec le sol par le talon (Fig. 38)

- Fin de la flexion de la hanche par le muscle ilio-psoas 1.
- Extension du genou par le muscle quadriceps 5.
- Fin de la flexion de la cheville par les muscles fléchisseurs de la cheville 3 et les extenseurs des orteils 4.

Appui monopode vertical (Fig. 39) alors que la plante est en contact total sur le sol

- Action persistante du muscle quadriceps 5.
- Début de contraction du muscle grand fessier 6.

Déséquilibre antérieur (Fig. 40)

- Extension de la hanche par le muscle grand fessier 6, aidé par les ischio jambiers 7.
- En antagonisme-synergie avec le muscle quadriceps 5.
- Flexion de la cheville par les muscles fléchisseurs 3 en synergie avec 6.

Première impulsion motrice avant la fin du double appui (Fig. 41)

- Extension persistante de la hanche par 6 et 7.
- Extension persistante du genou par 5.
- Extension de la cheville par le muscle triceps 8 et les fléchisseurs des orteils 9.

Deuxième impulsion motrice (Fig. 42) sur membre d'appui en extension complète alors que le membre oscillant va se poser

- Renforcement des actions 5, 6, 7, 8 et 9, particulièrement pour le muscle fléchisseur propre de l'hallux.

Début d'oscillation (Fig.43) alors que l'autre membre est porteur

- Rétraction du membre oscillant par contraction des muscles ischio jambiers 7 et des fléchisseurs de la cheville 3.
- Flexion de la hanche par le muscle ilio-poas 1.

Oscillation du membre vers l'avant (Fig. 44)

- Renforcement des actions des précédents 1 et 5 avec relâchement de 7.
- Extension du genou par contraction du muscle quadriceps 5.
- Relèvement des orteils par action des muscles extenseurs des orteils 10.

Arrivée au sol du membre oscillant (Fig. 45)

- Début d'un nouveau cycle.

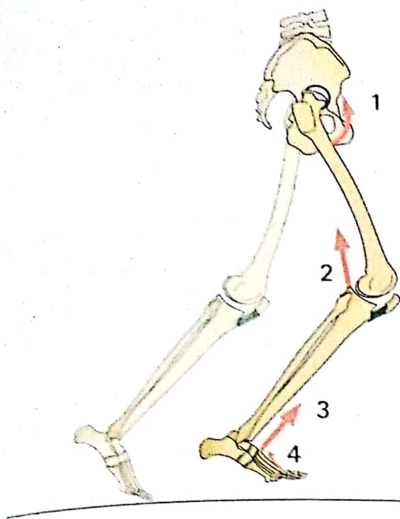


Fig. 37

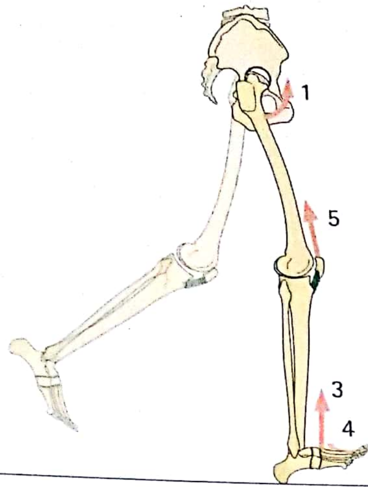


Fig. 38

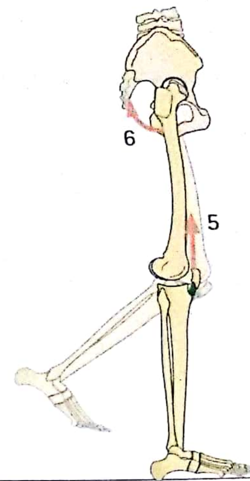


Fig. 39

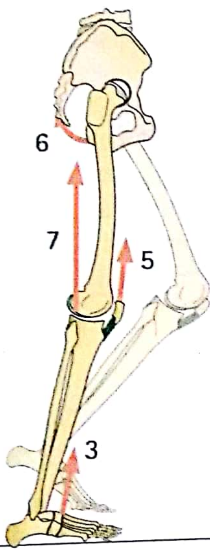


Fig. 40

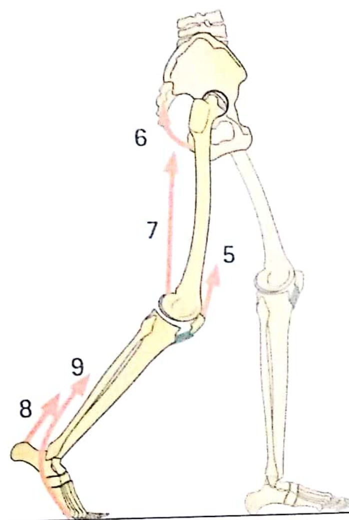


Fig. 41

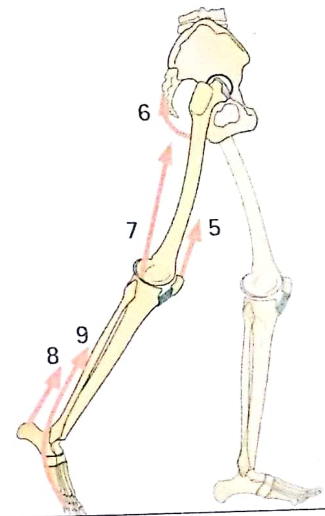


Fig. 42

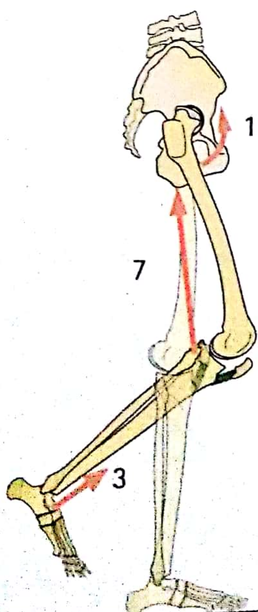


Fig. 43

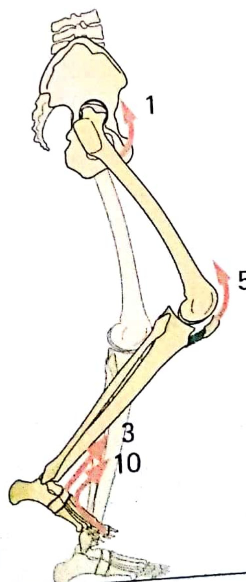


Fig. 44

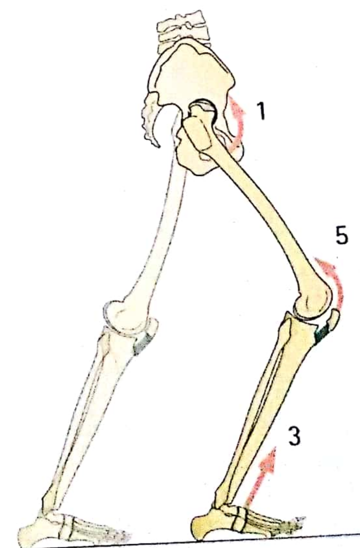


Fig. 45

Chaînes musculaires et course

Il ne faudrait pas croire que tous ces muscles travaillent « chacun pour soi » et de façon incohérente. En réalité, ils fonctionnent suivant des **schémas moteurs** très précis, sous la dépendance du cerveau, mais surtout du cervelet. Ils intègrent des **relations d'antagonisme-synergie** et de **synergie** pour la formation de **chaînes musculaires**.

Ces chaînes musculaires sont fonctionnellement très importantes. Par exemple, celle de l'**extension du membre inférieur** (Fig. 46 : départ de course) lors de l'impulsion motrice. Cette chaîne met en lumière l'utilité des muscles bi-articulaires, comme ici, le muscle droit de la cuisse D et le triceps T. *Leur action sur l'articulation distale dépend de la position de l'articulation proximale*, qui va déterminer leur état de pré-tension. Dans le cas ici illustré, le grand fessier G en portant la hanche en extension, va tendre le muscle droit de la cuisse et favoriser ainsi son action d'extension du genou. À son tour, en portant le genou en extension, le muscle droit de la cuisse va tendre les muscles gastrocnémiens, augmentant de ce fait la puissance du triceps pour étendre la cheville et donner le maximum pour l'impulsion motrice.

Au total, **une partie de la puissance du muscle grand fessier va se trouver reportée d'abord sur le muscle droit de la cuisse, puis, par son intermédiaire, sur le triceps**. Ce système est très avantageux sur le plan mécanique, car qui dit muscle puissant dit muscle lourd, si bien que le muscle le plus puissant, le grand fessier, est situé à la racine du membre, c'est-à-dire **près du centre de gravité du corps**. L'intérêt de rapporter les masses près de la racine est de *rapprocher le barycentre segmentaire de la racine* et de *diminuer le moment d'action global du membre inférieur*, ce qui procure une amélioration du rendement musculaire.

La marche ne suit pas toujours le schéma développé à la page précédente. Il existe des marches particulières et artificielles, comme le « pas de l'oie » (Fig. 47) en usage pour le défilé de certaines armées. Il nécessite une très grande force dans les muscles fléchisseurs de la hanche, une grande dépense physique ; il ne peut donc être utilisé longtemps.

Enfin, dérivé de la marche, il y a la course (Fig. 48) qui se caractérise par la **disparition du temps de double appui** (remarquez l'ombre séparée des appuis), remplacé par un temps dit « **de suspension** » plus ou moins long, qui est le début d'un saut…

Au total, ce chapitre est loin d'avoir épuisé toutes les caractéristiques de la marche et toutes les activités qui en dérivent…

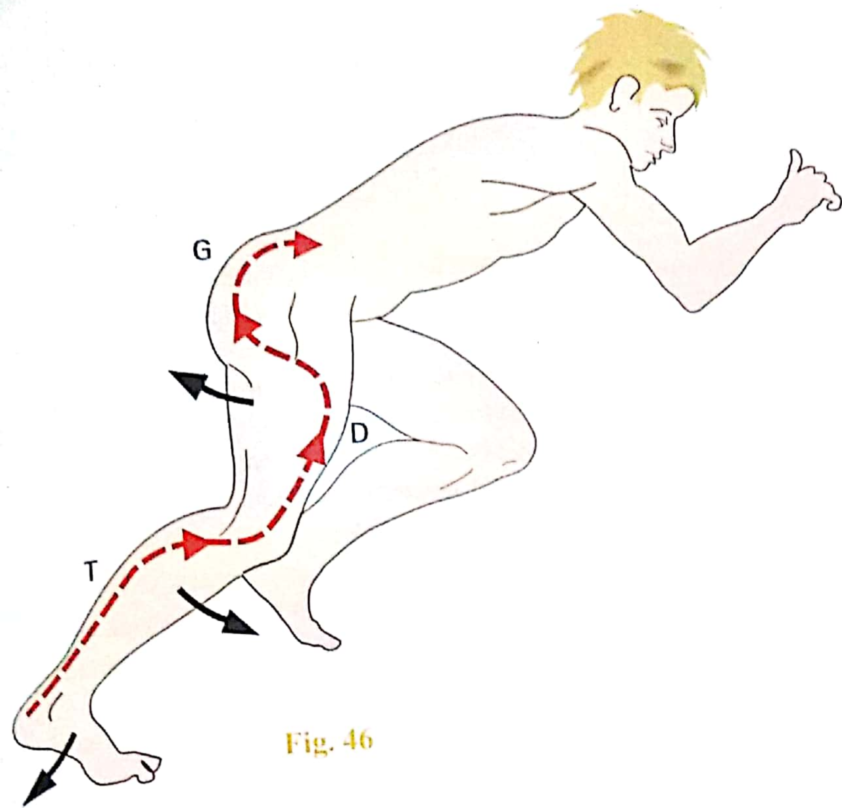
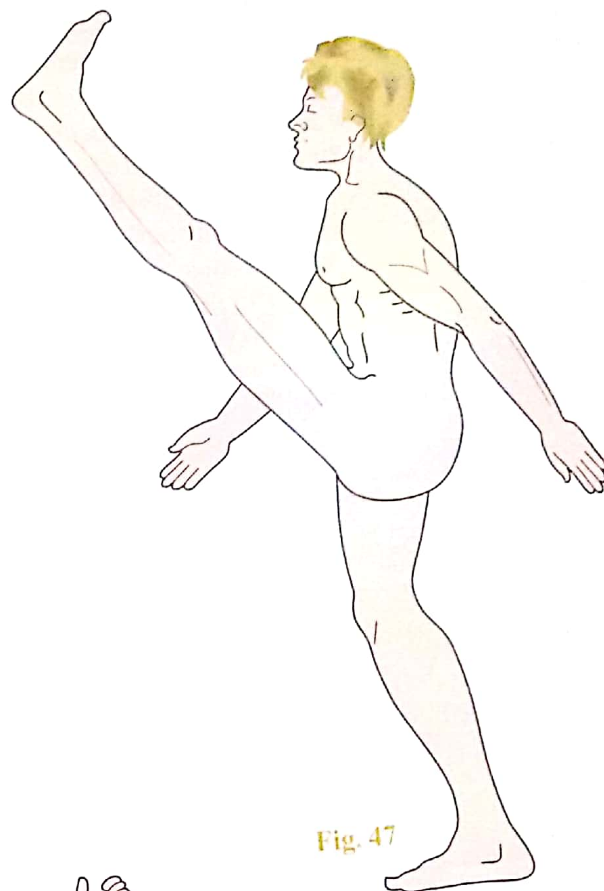
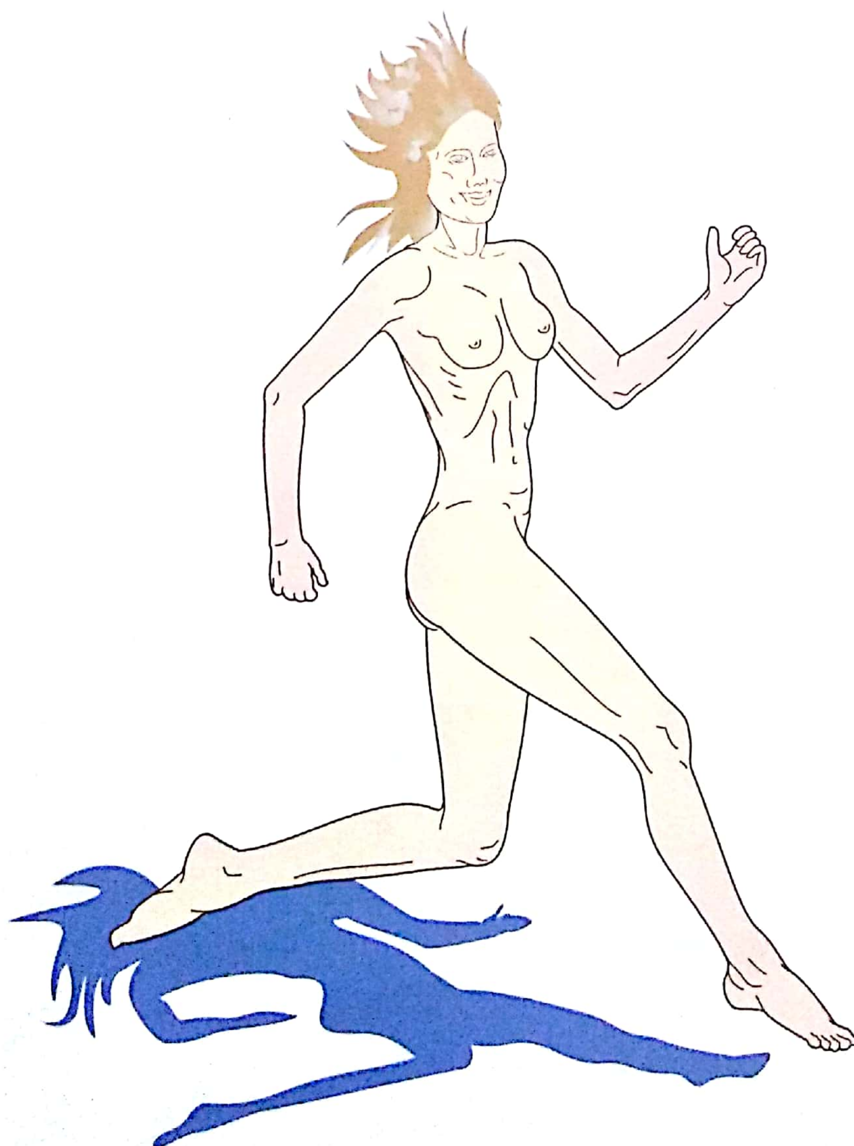


Fig. 46


Fig. 47


Fig. 48

La marche... c'est la liberté !

Marcher, c'est la première des libertés ! Celle qui nous donne l'**autonomie**, la possibilité de fuir le danger, d'aller vers ce qui nous nourrit et nous abreuve, de travailler, d'escalader les montagnes, de parcourir le vaste monde, d'aller vers l'autre...
Cette liberté, chèrement acquise, les péripéties de la vie peuvent la compromettre, à cause de lésions cérébrales, de perte des coordinations élémentaires, d'interruption de la conduction nerveuse ou de lésion médullaire, d'inefficacité musculaire par myopathie, de limitation ou de blocage des articulations par arthropathies ou arthrose, ou simplement après un traumatisme grave...
Parfois, grâce à une longue et difficile rééducation, il est possible de réapprendre à marcher. D'autres fois, la perte est définitive, mais la canne, cette prothèse externe qui transforme l'équilibre instable de la marche en équilibre temporairement stable, cette troisième jambe, illustration de l'énigme du Sphinx (« Qu'est-ce qui marche à quatre pattes le matin, à deux pattes le midi et à trois pattes le soir ? »), peut nous permettre de continuer à marcher tant bien que mal... Mais elle annonce souvent la perte définitive de notre autonomie.
Ces atteintes à notre liberté de marche peuvent nous condamner au fauteuil, à la chaise roulante ou pire, au lit, à la situation grabataire, antichambre de la fin.
Hommes, femmes qui marchez sans problèmes, soyez au moins conscients de cette liberté qui vous permet aussi de courir, de sauter, de danser, en un mot, de profiter pleinement de la vie... !
Le dessin qui illustre la page opposée est inspiré d'un dessin de Michel-Ange.



Fig. 49

ANNEXES

Les nerfs du membre inférieur

Issus des plexus lombal et sacral, les origines des nerfs du membre inférieur et leurs ramifications sont détaillées dans le tableau synoptique ci-contre. Chaque muscle est désigné par sa dénomination dans la nomenclature internationale. Les variations d'origine et d'anastomose sont nombreuses, mais, dans l'ensemble, on peut reconnaître les fonctions et les territoires de chacun des grands troncs nerveux.

Le plexus lombal

Le plexus lombal fournit par ses branches collatérales une innervation motrice aux muscles de la racine du membre inférieur. Par trois de ses racines, L2, L3 et L4, il va constituer deux nerfs principaux : le nerf fémoral et le nerf obturateur.

1. Le nerf fémoral
Il innerve la quasi-totalité des muscles du pelvis et surtout les muscles de la loge antérieure de la cuisse, le quadriceps, le sartorius, l'un des muscles adducteurs, le long adducteur. C'est le nerf de l'**extension du genou**. Il émet aussi un nerf sensitif très long, le **nerf saphène**, qui donne la sensibilité à la face antéro-interne du membre inférieur jusqu'au pied.

2. Le nerf obturateur
Il n'innerve qu'un seul muscle dans le pelvis, l'obturateur externe. Par contre, il participe majoritairement à l'innervation des muscles adducteurs : c'est donc le nerf de l'**adduction**. Il assure la sensibilité de la face interne de la cuisse.

Le plexus sacral

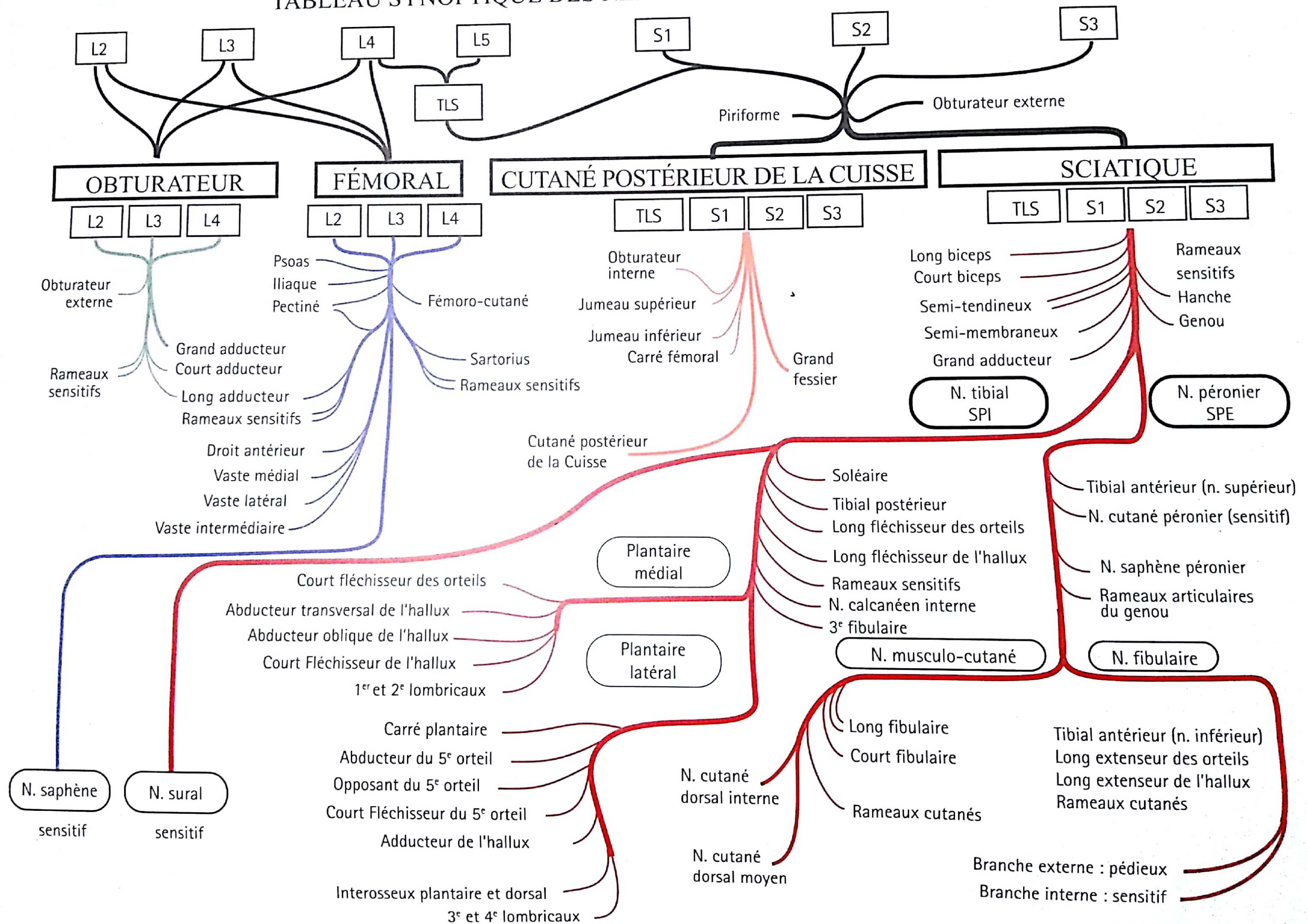
Le plexus sacral est constitué des trois premières racines et reçoit une importante anastomose du plexus lombal, le tronc lombo-sacral, formé de deux émanations de L4 et L5. Ses branches collatérales participent à l'innervation motrice du pelvis, en particulier pour les muscles glutéaux (fessiers). Il forme deux grands troncs nerveux à la face postérieure de la cuisse : le nerf cutané postérieur de la cuisse et le nerf sciatique.

1. Le nerf cutané postérieur de la cuisse
Il complète l'innervation motrice du pelvis, en particulier pour le grand glutéal (fessier). Il est donc le nerf de l'**extension de la cuisse**. Il assure la sensibilité de la face postérieure de la cuisse et de la moitié supérieure de la jambe.

2. Le nerf sciatique
Par ses branches collatérales, il innerve les muscles de la face postérieure de la cuisse : il est donc **fléchisseur du genou**, mais il innerve aussi des muscles de la loge interne, ce qui le fait participer à l'**adduction**. Il se termine par deux gros nerfs : le nerf tibial et le nerf fibulaire commun.

• Le nerf tibial
Par ses branches collatérales, il assure l'innervation motrice des muscles de la loge postérieure de la jambe. Il est donc **extenseur de la cheville** et **fléchisseur des orteils**. Il se termine en deux branches :
– le **nerf plantaire médial** ;
– le **nerf plantaire latéral** ;
qui se partagent l'innervation des muscles plantaires, pour les flexions et la latéralité des orteils. Ils assurent la sensibilité de la plante du pied.
Par le **nerf sural**, il donne la sensibilité à la face postérieure de la jambe et à la plante du pied.

• Le nerf fibulaire commun
Il assure l'innervation des muscles de la loge antérieure et de la loge antéro-externe de la jambe, les fibulaires. Il commande donc la **flexion** et la **latéralité de la cheville** ainsi que l'**extension des orteils** : il se termine dans le pédieux, seul muscle du dos du pied. Il donne la sensibilité à la face antérieure et à la face externe de la jambe ainsi qu'au dos du pied.


TABLEAU SYNOPTIQUE DES NERFS DU MEMBRE INFÉRIEUR
L2
L3
L4
L5
S1
S2
S3
TLS
Piriforme
Obturateur externe
OBTURATEUR
L2
L3
L4
FÉMORAL
L2
L3
L4
CUTANÉ POSTÉRIEUR DE LA CUISSE
TLS
S1
S2
S3
SCIATIQUE
TLS
S1
S2
S3
Obturateur externe
Rameaux sensitifs
Grand adducteur
Court adducteur
Long adducteur
Rameaux sensitifs
Psoas
Iliaque
Pectiné
Fémoro-cutané
Sartorius
Rameaux sensitifs
Droit antérieur
Vaste médial
Vaste latéral
Vaste intermédiaire
Obturateur interne
Jumeau supérieur
Jumeau inférieur
Carré fémoral
Grand fessier
Cutané postérieur de la Cuisse
Long biceps
Court biceps
Semi-tendineux
Semi-membraneux
Grand adducteur
Rameaux sensitifs
Hanche
Genou
N. tibial SPI
N. péronier SPE
Soléaire
Tibial postérieur
Long fléchisseur des orteils
Long fléchisseur de l'hallux
Rameaux sensitifs
N. calcanéen interne
3ᵉ fibulaire
Tibial antérieur (n. supérieur)
N. cutané péronier (sensitif)
N. saphène péronier
Rameaux articulaires du genou
Plantaire médial
Plantaire latéral
Court fléchisseur des orteils
Abducteur transversal de l'hallux
Abducteur oblique de l'hallux
Court Fléchisseur de l'hallux
1ᵉʳ et 2ᵉ lombricaux
N. musculo-cutané
N. fibulaire
Long fibulaire
Court fibulaire
Rameaux cutanés
N. cutané dorsal interne
N. cutané dorsal moyen
Tibial antérieur (n. inférieur)
Long extenseur des orteils
Long extenseur de l'hallux
Rameaux cutanés
Branche externe : pédieux
Branche interne : sensitif
Carré plantaire
Abducteur du 5ᵉ orteil
Opposant du 5ᵉ orteil
Court Fléchisseur du 5ᵉ orteil
Adducteur de l'hallux
Interosseux plantaire et dorsal
3ᵉ et 4ᵉ lombricaux
N. saphène
sensitif
N. sural
sensitif

Territoires sensitifs du membre inférieur

Ces territoires forment des bandes irrégulières allongées le long du membre inférieur, bien visibles sur une vue antérieure **(Fig. 1)** et une vue postérieure **(Fig. 2)**.

Le nerf cutané latéral de la cuisse , branche du nerf fémoral, innerve la face externe de la cuisse.

Près de l'épine iliaque antéro-supérieure , se situe une petite zone innervée par une branche du nerf abdomino-génital, branche collatérale du plexus lombal ; l'origine de la sensibilité est la même à la partie haute de la face interne de la cuisse, près des organes génitaux.

La fesse est innervée par les rameaux récurrents du nerf cutané postérieur de la cuisse.

La face antérieure de la cuisse est innervée par les rameaux musculaires médiaux, branche du nerf fémoral.

La face interne de la cuisse est innervée par le nerf musculo-cutané interne, branche du nerf fémoral.

La face externe de la cuisse est innervée par le nerf cutané latéral de la cuisse, branche du plexus lombal.

La face interne du genou doit sa sensibilité aux rameaux sensitifs du nerf obturateur et du nerf accessoire du nerf saphène, branche du nerf fémoral.

La face externe de la jambe tient sa sensibilité du nerf cutané sural latéral et du nerf accessoire du nerf sural, branches du nerf fibulaire.

La face antéro-interne de la cuisse et du genou, ainsi que la face interne de la jambe sont innervés par le nerf saphène, branche du nerf fémoral.

Au niveau du pied, la face dorsale est sensibilisée par le nerf musculo-cutané, branche du nerf fibulaire ; son bord externe , par la terminaison du nerf sural ; sa plante, ainsi que la dernière phalange des orteils , par les nerfs plantaires, branches terminales du nerf tibial. Une caractéristique très intéressante sur le plan clinique : la face dorsale de la première commissure , entre l'hallux et le deuxième orteil, est innervée par la terminaison du nerf fibulaire profond, si bien que lorsqu'existe une anesthésie limitée à cette zone très restreinte, on peut en déduire une lésion de ce nerf due, par exemple, à un syndrome de compression au niveau de la loge antérieure de la jambe.

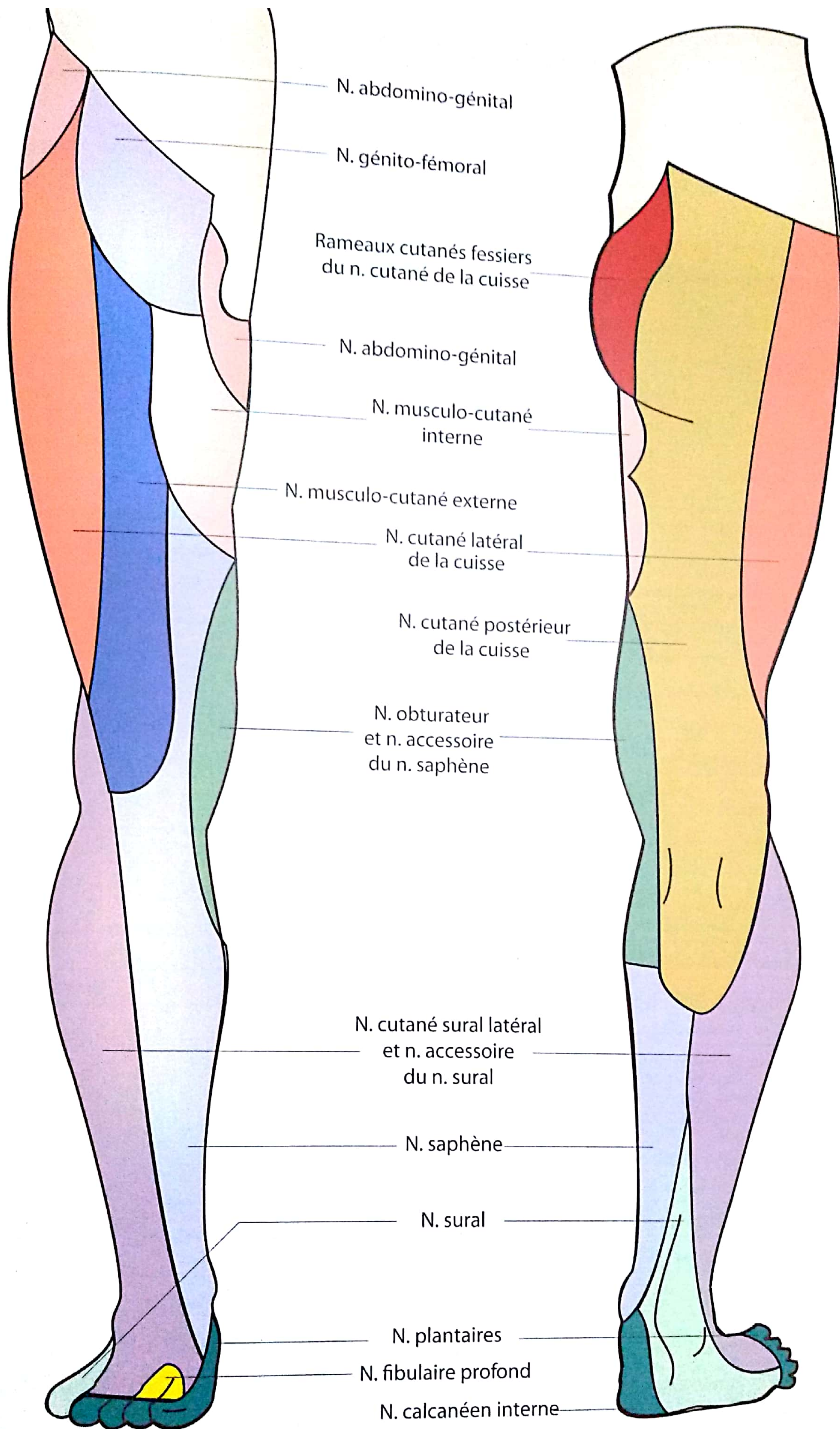

N. abdomino-génital
N. génito-fémoral
Rameaux cutanés fessiers
du n. cutané de la cuisse
N. abdomino-génital
N. musculo-cutané
interne
N. musculo-cutané externe
N. cutané latéral
de la cuisse
N. cutané postérieur
de la cuisse
N. obturateur
et n. accessoire
du n. saphène
N. cutané sural latéral
et n. accessoire
du n. sural
N. saphène
N. sural
N. plantaires
N. fibulaire profond
N. calcanéen interne

Fig. 1

Fig. 2

Lexique des termes anatomiques

Pour éviter d'alourdir le texte, nous avons utilisé dans cet ouvrage les termes français nouveaux. Dans ce lexique, nous indiquons leur équivalence en termes anatomiques traditionnels et en nomenclature latine internationale.

Termes français nouveaux	Termes traditionnels	*Nomenclature latine internationale*
Processus	Apophyse	*Processus*
Processus xiphoïde	Appendice xiphoïde	*Processus xiphoideus*
Ligament inguinal	Arcade crurale	*Ligamentum inguinale*
Articulation talocrurale	Articulation tibio-tarsienne	*Articulatio talocruralis*
Talus	Astragale	*Talus*
Calcanéus	Calcanéum	*Calcaneus*
Septum intermusculaire	Cloison intermusculaire	*Septum intermusculare*
Condyle fémoral latéral	Condyle fémoral externe	*Condylus lateralis*
Condyle médial	Condyle fémoral interne	*Condylus medialis*
Bord antérieur du tibia	Crête tibiale	*Margo anterior*
Surface poplitée	Creux poplité	*Facies poplitea*
Os cuboïde	Cuboïde	*Os cuboideum*
Os cunéiforme intermédiaire	Deuxième cunéiforme	*Os cuneatum intermedium*
Phalange moyenne	Deuxième phalange	*Phalanx media*
Corps	Diaphyse	*Corpus*
Épine	Épine	*Spina*
Os coxal	Iliaque (os)	*Os coxale*
Os ilium	Ilion	*Os ilium*
Os ischium	Ischion	*Os ischium*
Tractus iliotibial	Ligament iliotibial	*Tractus iliotibialis*
Ligament collatéral fibulaire	Ligament latéral externe du genou	*Ligamentum collaterale fibulare*
Ligament collatéral tibial	Ligament latéral interne du genou	*Ligamentum collaterale tibiale*
Malléole latérale	Malléole externe	*Malleolus lateralis*
Malléole mediale	Malléole interne	*Malleolus medialis*
Os métacarpien **– Base** **– Tête**	Métacarpien – Extrémité sup. ou proximale – Extrémité inf. ou distale	*Os metacarpale* *– Basis metacarpalis* *– Caput metacarpalis*
Os métatarsien	Métatarsien	*Os metatarsale*
Fibula	Péroné	*Fibula*
Surface articulaire supérieure (proximale)	Plateau tibial	*Facies articularis superior tibiae*
Apex du coccyx	Pointe du coccyx	*Apex coccygis*
Os cunéiforme médial	Premier cunéiforme	*Os cuneatum mediale*
Phalange proximale	Première phalange	*Phalanx proximalis*

Os pubis	Pubis	*Os pubis*
Patella	Rotule	*Patella*
Suture	Suture	*Sutura*
Tubercule mineur	Trochin	*Tuberculus minus*
Tubercule majeur	Trochiter	*Tuberculus majus*
Os cunéiforme latéral	Troisième cunéiforme	*Os cuneatum laterale*
Phalange distale	Troisième phalange	*Phalanx distalis*
Tubercule	Tubérosité	*Tuberculum*
Muscle abducteur du petit orteil	Abducteur du petit orteil	*Musculus abductor digiti minimi*
Muscle abducteur de l'hallux	Abducteur du gros orteil	*Musculus abductor hallucis*
Muscle biceps fémoral	Biceps crural	*Musculus biceps femoris*
Muscle carré fémoral	Carré crural	*Musculus quadratus femoris*
Muscle court fléchisseur de l'hallux	Court fléchisseur du gros orteil	*Musculus flexor hallucis brevis*
Muscle court fléchisseur du petit orteil	Court fléchisseur du petit orteil	*Musculus flexor digiti minimi brevis (pedi)*
Muscle court fléchisseur des orteils	Court fléchisseur plantaire	*Musculus flexor digitorum brevis*
Muscle court fibulaire	Court péronier latéral	*Musculus fibularis brevis*
Muscle court extenseur radial du carpe	Court radial	*Musculus extensor carpi radialis br*
Muscle sartorius	Couturier	*Musculus sartorius*
Muscle vaste intermédiaire	Crural	*Musculus vastus intermedius*
Muscle semi-membraneux	Demi-membraneux	*Musculus semimembranosus*
Muscle semi-tendineux	Demi-tendineux	*Musculus semitendinosus*
Muscle droit fémoral	Droit antérieur de la cuisse	*Musculus rectus femoris*
Muscle gracile	Droit interne de la cuisse	*Musculus gracilis*
Muscle long extenseur des orteils	Extenseur commun des orteils	*Musculus extensor digitorum long*
Muscle long extenseur de l'hallux	Extenseur propre du gros orteil	*Musculus extnesor hallucis longu*
Muscle long fléchisseur des orteils	Fléchisseur commun des orteils	*Musculus flexor digitorum longu*
Muscle gastrocnémien	Gastrocnémien ou jumeaux de la jambe	*Musculus gastrocnemius*
Muscle grand adducteur	Grand adducteur	*Musculus adductor magnus*
Muscle grand fessier ou glutéal	Grand fessier	*Musculus glutaeus maximus*
Muscle tibial antérieur	Jambier antérieur	*Musculus tibialis anterior*
Muscle tibial postérieur	Jambier postérieur	*Musculus tibialis postérior*
Muscle gastrocnémien	Jumeaux de la jambe ou gastrocnémien	*Musculus gastrocnémius*
Muscle jumeau inférieur	Jumeau inférieur de la fesse	*Musculus gemellus inferior*
Muscle jumeau supérieur	Jumeau supérieur de la fesse	*Musculus gemellus superior*
Muscles lombricaux	Lombricaux	*Musculi lumbricales*
Muscle long fléchisseur de l'hallux	Long fléchisseur propre du gros orteil	*Musculus flexor hallucis longu*
Muscle long fibulaire	Long péronier latéral	*Musculus fibularis (peroneus)*
Muscle long adducteur	Moyen adducteur	*Musculus adductor longus*
Muscle moyen fessier ou glutéal	Moyen fessier	*Musculus glutaeus medius*
Muscle obturateur interne	Obturateur interne	*Musculus obtrator internus*

Muscle opposant du petit orteil	Opposant du petit orteil	*Musculus opponens digiti minimi pedis*
Muscle pectiné	Pectiné	*Musculus pectineus*
Muscle court adducteur	Petit adducteur	*Musculus adductor brevis*
Muscle petit fessier ou glutéal	Petit fessier	*Musculus glutaeus minimus*
Muscle petit rhomboïde	Petit rhomboïde	*Musculus rhomboideus minor*
Muscle plantaire	Plantaire grêle	*Musculus plantaris*
Muscle iliopsoas	Psoas iliaque	*Musculus iliopsoas*
Muscle piriforme	Pyramidal du bassin	*Musculus piriformis*
Muscle quadriceps fémoral	Quadriceps crural	*Musculus quadriceps femori*
Muscle soléaire	Soléaire	*Musculus soleus*
Muscle tenseur du fascia lata	Tenseur du fascia lata	*Musculus tensor fasiae latae*
Muscle triceps sural	Triceps sural	*Musculus triceps surae*
Muscle vaste latéral	Vaste externe	*Musculus vastus lateralis*
Muscle vaste médial	Vaste interne	*Musculus vastus medialis*

Bibliographie

Barnett C.H., Davies D.V. & Mac Conaill M.A. ; *Synovial Joints. Their structure and mechanics*. C.C. THOMAS, Springfield U.S.A., 1961

Barnier L. ; *L'analyse des mouvements*. P.U.F. Paris, 1950

Basmajian J.V. ; *Muscles alive. Their function revealed by electromyography*. Williams and Wilkins, Baltimore, 1962

Biesalski K., Mayer L. ; *Der physiologische Schnerwerps flanzung*. Springer Berlin, 1916

Bonnel F. ; *Abrégé d'anatomie fonctionnelle et biomécanique* : tome III Membre Inférieur. Sauramps, 2002

Bridgeman G.B. ; *The Human Machine. The anatomical structure and mechanism of the human body*. 1 Vol., 143 p., Dover Publications Inc., New York, 1939

Bunnell S. ; *Surgery of the hand*. Lippincott, Philadelphia. Ed.1., 1944., Ed.5 revised by Boyes, 1970

Cardano Gerolamo, mathématicien italien (1501-1576) : à propos du Cardan. Voir sur Internet

De Doncker E., Kowalski C. ; *Cinésiologie et rééducation du pied*. Masson, Paris, 1979

De Doncker E., Kowalski C. ; Le pied normal et pathologique. *Acta Orthop.Belg.*, 1970, 36 : 386-559

Descamps L ; *Le jeu de la hanche*. Thèse, Paris, 1950.

Duchenne (de Boulogne) G.B.A. ; *Physiologie des mouvements*, 1 Vol., 872 p., J-B. Ballière et Fils, Paris, 1867 (épuisé). Fac similé : Hors commerce édité par les Annales de Médecine Physique, 1967

Duchenne (de Boulogne) G.B.A ; *Physiology of motion*, translated by E.B. Kaplan, 1949. W.B. Saunders Co, Philadelphia and London

Fick R. von ; *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke, unter Berücksichtigung der bewegenden Muskeln*

Fick R. ; *Handbuchder Anatomie und Mechanik der Gelenke – 3*. Teil Iena Gustav Fischer, 1911

Fischer O. ; *Kinematik orhanischer Gelenke*. *Braunsschweig*, F. Vierweg und Sohn, 1907

Gauss Karl Friedrich, mathématicien allemand (1777-1855) ; *La géométrie non euclidienne* (à propos du paradoxe de Codmann). Voir sur Internet

Ghyka Matila C. ; *Le Nombre d'Or*, 1 vol., 190 p., Gallimard, Paris, 1978

Henke J. ; *Die Bewegungen der Hanwurzel. Zeitschrift für rationelle Medizine*. Zürich, 1859, 7, 27

Henke W. ; *Handbuch der anatomie und mechanik der gelenke*. C.F. Wintersche Verlashandlung, Heidelberg, 1863

Hilgenreiner H. ; Zur Frühdiagnose der angeborenen Hüftgelenksverrenkung. *Med. Klin.*, 21 (1935), 1385-1388, 1425-1429

Kapandji A.I. ; La Biomécanique « Patate ». *Ann. Chir. Main*, 1987, 5, 260-263

Kapandji A.I. ; Vous avez dit Biomécanique ? La Mécanique « Floue » ou « Patate » « Maîtrise Orthopédique » n° 64, 1997, p. 1-4-5-6-7-8-9-10-11

Le Cœur P. ; *La pince malléolaire. Physiologie normale et pathologique du péroné*. Louis Arnette, Paris, 1938

Mac Conaill M.A., Barnett C.H., Dvies D.V. ; *Synovial Joints*. Longhans Ed., London, 1962

Mac Conaill M.A. ; Movements of bone and joints. Significance of shape. *J. Bone and Joint Surg.*, 1953, 35B, 290

Mac Conaill M.A. ; Studies in the mechanics of the synovial joints : displacement on articular surfaces and significance of saddle joints. *Irish J. M. Sci.*, 223-235, 1946

Mac Conaill M.A. ; *Studies on the anatomy and function of Bone and Joints*. 1966, F. Gaynor Evans, Ed. New York

Mac Conaill M.A. ; Studies in mechanics of synovial joints ; hinge joints and nature of intra-articular displacements. *Irish J. M. Sci.*, 1946, Sept., 620

Mac Conaill M.A. ; The geometry and algebra of articular Kinematics. *Bio. Med. Eng.*, 1966, 1, 205-212

Mac Conaill M.A. & Basmajian J.V. ; *Muscle, and movements : a basis for human kinesiology*. Williams & Wilkins Co, Baltimore, 1969

Maquet P.G.J. ; *Biomechanic of the knee*. Springer, Berlin, 1976

Maquet P.G.J. ; Biomécanique de la gonarthrose. *Acta Orthop.Belg.*, 1972, 38, 33-54

Maquet P. ; Un traitement biomécanique de l'arthrose fémoro-patellaire : l'avancement du tendon rotulien. *Rev. Rhum. Mal Osteoartic.*, 1963 ; 30 : 779

Marey E. J. ; *Emploi de la chronophotographie pour déterminer la trajectoire des corps en mouvement avec leur vitesse à chaque instant et leurs positions relatives. Application à la mécanique animale*. C.R. à l'Académie des Sciences, 7 Août 1882, 267-270

Marey E. J., Deemeny ; *Locomotion humaine : mécanisme du saut*. C.R. à l'Académie des Sciences, 24 Août 1885, 489-494

Marey E. J., Pages ; *La Locomotion comparée : mouvements du membre pelvien chez l'homme, l'éléphant et le cheval*. C.R. à l'Académie des Sciences, 18 Juillet 1887, 149-156

Marey J. ; *La machine Animale*, 1 Vol., Alcan, Paris, 1891

Menschik A. ; Mechanik des Kniezelenkes. *Z. Ortop.*, 1974 , 112, 481-495

Menschik A. ; Mechanik des Kniezelenkes. *Z. Orthop.*, 1975 , 113, 388-400

Menschik A. ; Biometrie. *Das Konstruktionprinzip des Kniesgelenks, des Hüftgelenks, der Beinläng und der Körpergrosse*. Springer, Berlin, 1987

Merkel F. S. ; *Die Anatomie des Menschen*. Editions PLUS, 1913

Moreaux A. ; *Anatomie artistique de l'Homme*, 1 Vol., Maloine, Paris, 1959

Ockham Guillaume (d') ; Moine franciscain anglais, philosophe scolastique (1280-1349) ; *Le Principe d'Économie Universelle*. Voir sur Internet

Ombredanne L., Mathieu P. ; *Traité de chirurgie orthopédique*. Paris, Masson, 1937

Poirier P. & Charpy A. ; *Traité d'Anatomie Humaine*, Masson, Paris, 1926

Rasch P. J & Burke R.K. ; *Kinesiology and applied Anatomy. The science of human movement*, 1 Vol., 589 p., Lea & Febiger, Philadelphia, 1971

Riemann Georg Friedrich Bernhard, mathématicien allemand (1826-1866) ; *La géométrie non euclidienne (à propos du paradoxe de Codmann)*. Voir sur Internet

Roud A. ; *Mécanique des articulations et des muscles de l'homme*. Librairie de l'Université, Lausanne, F. Rouge & Cie, 1913

Rouvière H. ; *Anatomie humaine descriptive et topographique*. Masson, Paris, 4e ed., 1948

Slocum D.B. ; Rotatory instability of the knee : its pathogenesis and a clinical test to demonstrate its presence (1968). *Clinical Orthop. And Rel. Research*, 2007 Janv., 454 : 5-13

Steindler A. : *Kinesiology of the Human Body*. 1 Vol., 708 p., Ch. C. Thomas, Springfield, 1964

Strasser H. : *Lehrbuch der Muskel und Gelenkmechanik*. Vol. IV, J. Springer, Berlin, 1917

Testut L. : *Traité d'anatomie humaine*. Doin, Paris, 1893

Trendelenburg G. F. *Deutsche Med. Woch.* 1895

Vandervael F. : Analyse des mouvements du corps humain. Maloine Ed., Paris, 1956.

Von Recklinghausen H. : *Gliedermechanik und Lähmungsprothesen*. Vol. I, Julius Springer, Berlin, 1920

Weber W., Weber E. : *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge*. Dietrich, Göttingen, 1836

Weber W., Weber E. : Über die Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge nebst der Beschreibung eines Versuches über das Herausfallen des Schenkelkopfs im luftverdünnten Raum. Ann. *Phys. Chem.* 40

Welcker H. : *Ueber das Hüftgelenk, nebst Bemerkungen über Gelenke überhaupt*. *Zeitschrift* für Anatomie und Entwicklungsgeschichte, Leipzig, 1876 ;

Wiberg G. : Roentgenographic and anatomic studies on the patellar joint. *Acta Orthop. Scand.*, 1941, 12 : 319-410

Index

Q

R

S

T

V

Modèles de mécanique articulaire

Recommandations

Pourquoi des modèles de mécanique articulaire… ?
Parce que ces **travaux manuels**, qui nécessitent de l'application et du soin de la part du lecteur qui aura la patience de les réaliser, sont de véritables **schémas à trois dimensions**. Ils permettent de comprendre, de façon intuitive, le fonctionnement des articulations. De plus, ce sont des objets qui peuvent servir à l'enseignement, soit en les faisant réaliser par les élèves, soit comme démonstration.
Ils font l'originalité de ces ouvrages sur l'anatomie fonctionnelle de l'appareil locomoteur.
Si vous voulez réaliser l'un de ces modèles, vous devez d'abord en reporter le dessin sur une feuille de carton d'**un millimètre d'épaisseur** ou, à défaut, sur une carte de bristol épais.
Une solution de facilité consiste à coller directement la feuille correspondante préalablement détachée, mais elle est à éviter car elle détruit votre livre et, en cas d'erreur, vous ne pouvez plus vous « rattraper ». Il est donc préférable de *coller une photocopie* de la page qui vous intéresse. La meilleure solution est de *reporter le dessin avec un papier carbone*, qui présente l'avantage de ne pas être gêné ensuite par le papier collé. Enfin, une solution avantageuse consiste à réaliser une photocopie avec agrandissement format A3, ce qui permet de réaliser des modèles plus grands.
La réalisation de ces modèles est facile à condition de *suivre strictement les instructions* qui accompagnent les planches et sont illustrées par des schémas de montage. *Ne commencez jamais à découper sans avoir lu les instructions en entier.* Si vous faites une erreur, vous pouvez reporter la pièce sur un autre carton de même épaisseur et la recommencer.
Les pliures sont nettes et régulières lorsqu'on a pris soin auparavant d'*inciser légèrement* le carton, sur un quart de son épaisseur, avec une lame de rasoir, un cutter ou un bistouri, du côté de l'extérieur du pli. Faites donc très attention *au sens de la pliure* qui vous est indiqué toujours de la même manière :

- les pliures indiquées par une ligne discontinue de tirets doivent être *incisées du côté recto* et *pliées vers le verso* (pour mémoire, le recto est la face imprimée, le verso l'envers) ;
- les pliures indiquées par une ligne de points-tirets doivent être *incisées du côté verso* et *pliées vers le recto*. Pour les repérer sur le verso, il est commode de perforer à l'aide d'une aiguille fine *un point à chaque extrémité de la ligne de pliure*.

Les collures doivent se faire à la colle cellulosique à séchage rapide. Les *surfaces grisées*, délimitées par des pointillés, qu'il ne faut pas confondre avec les tirets d'une pliure, représentent des zones de *collage au recto*. Lorsque cela était possible, on a indiqué les deux surfaces d'un même collage par la même lettre. Faites vos collures une par une ; *attendez qu'une collure soit bien sèche pour passer à la suivante* sur la même pièce. Pendant ce temps, faites des collures sur une autre pièce. Pendant le séchage maintenez les pièces sur une planchette de bois par des élastiques ou des épingles qui fixent un pli, maintiennent une languette.
Par exception, pour le modèle 5, les pliures qui sont des charnières articulaires doivent être réalisées sans incisure (ou alors, très superficielles) pour des raisons de solidité ultérieure, à l'usage.
Comme **matériel supplémentaire**, vous aurez besoin de :

- carton épais (1 mm) pour renforcer certaines pièces ou servir de base (modèles 1 et 3) ;
- attaches parisiennes du plus petit modèle (pour la réalisation du modèle 3) : chez le papetier ;
- fils de caoutchouc fins utilisés en couture pour les bordures de chaussettes. On trouve ce genre de « fil élastique sur carte » ou « fil élastique de couturière » dans les merceries ou les boutiques d'article de couture ;
- les tendons sont simulés par du gros fil, de la ficelle fine ou mieux du cordonnet tressé.

Réalisation des modèles

Modèle 1 : mise en évidence du rôle des ligaments croisés et latéraux

Ce modèle permet de mettre en évidence la tension élective des ligaments croisés et latéraux pour certains mouvements (voir p. 125). Ainsi s'explique, en particulier, le rôle de « rappel » du condyle sur la glène joué par les ligaments croisés lors de la flexion-extension.

Réalisation (Planche I)
Avant tout découpage, il est préférable de reporter les deux pièces de ce modèle **(Fig. 1)**, le profil fémoral **A** et le profil tibial **B**, sur un carton épais (1 mm).
Installez ensuite, comme figuré sur le schéma de montage, les élastiques, si possible de couleurs différentes ; matérialisant les deux ligaments croisés et le ligament latéral interne ; pour cela, prenez des bracelets élastiques et coupez-les. Faites un nœud à une extrémité et passez-les à travers les trous du profil tibial d'arrière en avant, de telle sorte que le nœud se trouve en arrière. Collez ensuite le profil tibial sur la moitié inférieure d'un fort carton rectangulaire (voir schéma de montage, **Fig. 2**). Si les nœuds gênent le collage, faites de petits évidements à leur niveau dans le carton de base.
Passez ensuite chaque élastique dans le trou correspondant du profil fémoral, en les enfilant d'avant en arrière :

- le ligament croisé antéro-externe, parti de a, se fixe en b ;
- le ligament croisé postéro-interne, parti de c, aboutit en d ;
- le ligament latéral interne, issu de e, se fixe en f.

Utilisation

– Le ligament croisé antéro-externe s'allonge lors de la flexion (flèche rouge), ce qui correspond à une mise en tension de l'élastique. Pour que le ligament conserve la même longueur, il faut ramener le condyle vers l'avant : c'est le *mouvement de rappel du condyle par le ligament croisé antérieur*.

– De même, en partant de la position de flexion, le ligament croisé postéro-interne s'étire lors de l'extension (flèche bleue). Pour qu'il reprenne sa longueur initiale, il faut repousser le condyle vers l'arrière : c'est le *mouvement de rappel du croisé postérieur*.

– En faisant *rouler sur place*, c'est-à-dire avec glissement, le condyle fémoral sur la glène, on constate que *le ligament latéral est plus tendu dans l'extension* que dans la flexion.

Modèle 2 : les plaquettes articulées démontrant la stabilité antéro-postérieure du genou (voir Fig. 185, p. 125)

Ce modèle **(Fig. 3)** permet de comprendre comment grâce aux ligaments croisés le glissement antéro-postérieur est rendu impossible sans que cela empêche la flexion-extension du genou.

Réalisation (Planche I)

1. Découpez les deux plaquettes A et B (Planche I).
2. Dans du carton plus fort, découpez deux autres plaquettes exactement de mêmes dimensions.
3. Dans une feuille de papier ordinaire, découpez trois bandelettes d'un centimètre de largeur sur toute la longueur de la feuille (A4).

Pour le **montage**, voir la **Fig. 4**.

4. Sur la plaquette A, collez l'extrémité de chacune des bandelettes **(a)** sur les zones grisées **a**, **b** et **c** en vous assurant qu'elles restent strictement parallèles au grand côté de la plaquette.
5. Collez par-dessus la plaquette **A** et les extrémités des trois bandelettes déjà collées, l'une des plaquettes de carton fort, qui doit recouvrir exactement la plaquette A.
6. Posez cet assemblage sur la table **(b)**, le carton fort en dessous, et rabattez par-dessus la plaquette **A**, les trois bandelettes de papier doivent rester parallèles entre elles et avec le grand côté de la plaquette.
7. Posez par-dessus la plaquette **B**, recto ver le haut, en orientant la zone grisée **a'** du côté de l'extrémité libre de la bandelette médiane.
8. Rabattez sur la plaquette l'extrémité libre des trois bandelettes qui viennent alors se coller en **a'**, **b'**et **c'**. Les trois plaquettes doivent être appliquées l'une sur l'autre.
9. Collez par-dessus **B**, la deuxième plaquette **(c)** en carton fort, tendez fortement les trois bandelettes, posez un poids sur l'ensemble du montage et attendez un bon séchage.
10. Il ne reste plus qu'à couper **(d)** les bandelettes qui dépassent.

À l'intérieur du montage, les bandelettes, qui figurent les ligaments croisés, sont elles-mêmes croisées, si bien que leur tension empêche tout écart vertical des plaquettes.

Utilisation

Avec ce modèle, on peut s'assurer **(Fig. 5)** qu'il est impossible de faire glisser l'une des plaquettes sur l'autre dans le sens de la longueur **(a)**.

Par contre, si l'on prend seulement la plaquette supérieure et qu'on l'incline d'un côté, elle va *tourner autour de la charnière constituée par l'un des petits côtés* **(b)**. Il en est de même pour l'inclinaison opposée **(c)**. Les deux plaquettes ne semblent pas tenir l'une à l'autre et *pourtant elles sont articulées à chacune de leurs extrémités*.

Condyles et glènes réalisent un montage analogue, avec cette différence cependant que les « bandelettes », figurant les ligaments croisés, ne sont pas égales entre elles, ni fixées aux extrémités d'une base de même longueur. Il s'ensuit que la rotation s'effectue, non pas autour de deux axes seulement, *mais autour d'une succession d'axes alignés sur la courbe des condyles*, ce qui est démontré par le modèle suivant.

Modèle 3 : déterminisme expérimental du contour de la trochlée et des condyles

Ce modèle (voir Fig. 54 et 55, p. 87) permet de tracer soi-même le contour des condyles et de la trochlée, ce qui met en lumière le **rôle des ligaments dans le déterminisme de la forme des surfaces articulaires**.

Réalisation (Planche I)

1. Découpez les différentes pièces de ce modèle :
   - le plateau tibial **A** ;
   - une pièce appelée *base fémorale* **B** venant se fixer sur **C** ;
   - le socle rectangulaire sur laquelle va être réalisé le tracé ; on y voit en traits gras le raccordement du contour articulaire avec la diaphyse fémorale, qui va être tracée ultérieurement ;
   - la patella prolongée en bas par le ligament patellaire ;
   - un aileron rotulien **AR** ;
   - le ligament croisé antéro-externe **LCAE** ;
   - le ligament croisé postéro-interne **LCPI** ;
   - et trois bandelettes servant à la confection de « rondelles » épaisses pour le montage.
2. Effectuez le pliage accordéon des bandelettes servant à réaliser des « rondelles », puis faites un trou dans les six épaisseurs en même temps (ce n'est pas facile…).
3. Faites à chaque extrémité du LCPI le double pliage avant de percer les trous 3 et 4.
4. Percez les trous sur les autres pièces, exactement aux endroits indiqués.

Assemblage (Planche III)

L'assemblage s'effectue **(Fig. 6)** au moyen d'attaches « parisiennes » (encore appelées « clou à deux tiges à tête creuse »)

de la plus petite taille, achetées chez le papetier. Les trous se correspondent sur chacune des pièces ; montez-les dans l'ordre de leur numéro sans oublier d'interposer une rondelle au niveau des trous 5, 6 et 7.

Pour terminer, la base fémorale est fixée sur la platine **C** au niveau de la zone hachurée, par les trous 8 et 9.

Vous constaterez que pour que le modèle fonctionne correctement, vous devez faire un *pan coupé* (flèche p) sur la rondelle du trou 4, mais sans entamer le LCPI lui-même.

Utilisation

Le modèle est alors prêt à fonctionner **(Fig. 7)**.

En partant de la position d'extension, le plateau tibial étant poussé le plus possible vers la gauche, grâce au pan coupé de la rondelle du trou 4, on le déplace progressivement vers la droite (flèche rouge), et pour chaque position, on trace au crayon le contour postérieur de la patella et le contour supérieur du plateau tibial.

À mesure que le plateau tibial se déplace vers la droite, *on voit sa face supérieure tracer la courbe du condyle* en même temps que la face postérieure et l'*angle postéro-supérieur de la patella dessinent le contour de la trochlée* **(Fig. 8)**. Si le modèle a été bien monté, ces deux courbes se raccordent avec les deux traits gras tracés sur le socle, et la courbe de la trochlée se raccorde avec celle du condyle.

Il est ainsi démontré que le contour des condyles et de la trochlée n'est que la **courbe enveloppante des positions successives** respectivement du plateau tibial et de la patella dans un **système mécanique** défini par la *longueur relative* et la *disposition des ligaments croisés* et des *connexions ligamentaires de la patella*. On pourrait très bien réaliser d'autres contours en modifiant un ou plusieurs éléments de cet ensemble mécanique.

Modèle 4 : modèle de pied

Ce modèle est une version simplifiée du modèle proposé dans les premières éditions. Il est beaucoup plus facile à réaliser, et permet pratiquement les mêmes démonstrations.

Réalisation (Planche IV)

1. Découpez les différentes pièces de ce modèle :
   - la jambe **A,** les segments articulés sous-jacents représentant le cardan de la cheville. Les deux fentes doivent être soigneusement découpées au bistouri ou au cutter ;
   - la pièce intermédiaire du tarse antérieur **B** ;
   - le calcanéus **C** ;
   - le stabilisateur calcanéen **D** ;
   - les cinq rayons du pied : premier rayon **I**, deuxième rayon **II**, etc.
2. Pour augmenter la rigidité de la partie jambière de la pièce **A**, deux bandes du même carton peuvent la renforcer en les collant parallèlement à ses deux bords.

Montage (Planche V)

Sur une vue « éclatée » **(Fig. 9)**, on note la disposition et l'emboîtement des différentes pièces :

- la pièce jambière **A** comporte trois pliures opposées : **x**, **y**, **z**, (Fig. 10), qui sur le modèle fini vont représenter le « **cardan hétéro-cinétique** » de la cheville avec l'axe de la cheville **x** et l'axe de Henke **z** ;
- ce montage est *rendu rigide* par l'insertion de la pièce calcanéenne **C**, en introduisant les deux languettes dans les fentes, bloquées ensuite par des *clavettes* enfoncées dans les trous des languettes. Ces clavettes peuvent être constituées par des fragments de cure-dents ou d'allumettes ;
- la pièce calcanéenne **C** est complétée par le stabilisateur calcanéen **D**, enclenché, fente contre fente (flèche jaune). Le bord de la pièce **D** doit parvenir au niveau du bord de la pièce **C** ;
- les cinq rayons sont réalisés par pliure **(Fig. 11)** après incision légère sur le verso et collage de la languette. Il faut attendre que le collage soit solide pour continuer ;
- les rayons sont collés sur la languette correspondante de la pièce intermédiaire du tarse antérieur **B**, en respectant soigneusement leur écartement et leur divergence, telle qu'elle est indiquée sur la pièce **B**. On aura fait auparavant les incisures au recto de cette pièce, à la base de chaque languette, qui sont les axes de flexion-extension des métatarsiens ;
- lorsque cet ensemble constitué par la pièce **B** et les cinq rayons est solide, on peut le coller à la face supérieure de la partie **T** de l'ensemble jambier. Ainsi se trouve constituée la liaison tarso-métatarsienne.

Le modèle est maintenant complet, mais *le montage n'est pas encore équilibré* par les tendeurs indispensables pour assurer, au minimum, l'équilibre du pied posé sur un plan horizontal.

Ces **tendeurs élastiques** sont, au mieux, réalisés par des « fils élastiques de couturière ». Pour les fixer sur les plaques de carton, il est facile de les coincer dans une petite fente créée à l'aide d'un bistouri ou d'un cutter sur le bord du carton.

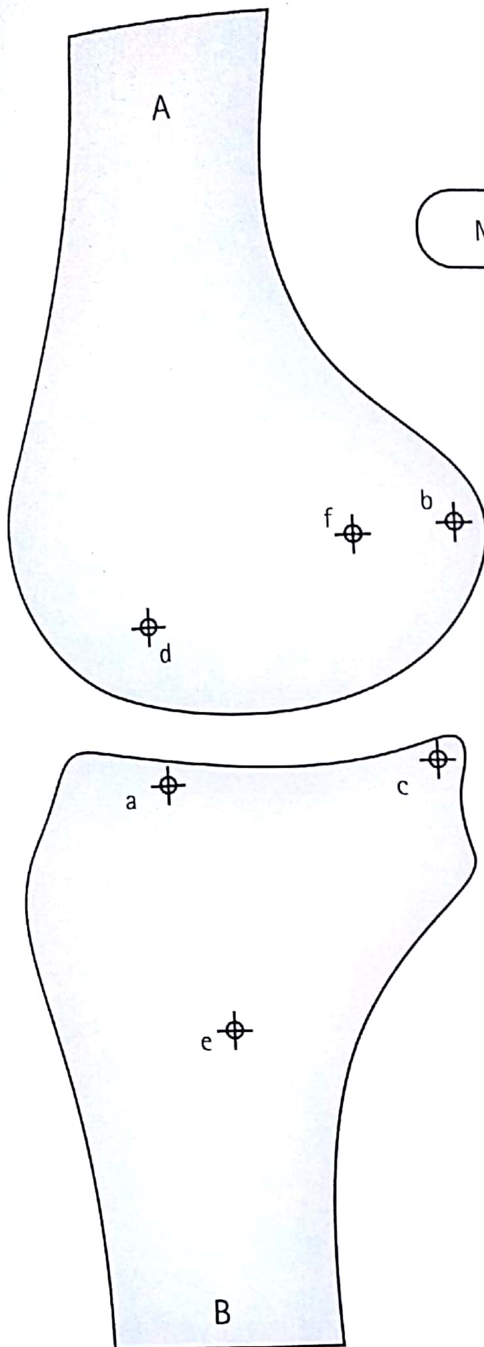
Sur le modèle **(Fig. 9)**, ces fentes, au nombre de cinq, sont repérées par les petites flèches rouges.

Sur une vue en **perspective antéro-interne (Fig. 12)**, en **profil interne (Fig. 13)** ou **externe (Fig. 14)**, on voit l'installation de ces fils élastiques, qui simulent l'*équilibre du tonus des muscles* :

- le *fil bleu*, tendu entre le premier rayon et le calcanéus simule les muscles formant la *corde de l'arche interne*. Il est facile d'en régler la tension au niveau de son accrochage calcanéen ;
- le *fil rouge*, tendu de *façon triangulaire* entre la pièce tarsienne et la tubérosité du calcanéus en passant par la pièce jambière, simule l'*équilibre entre fléchisseurs et extenseurs de la cheville*. On peut régler l'équilibre des tensions de ce fil au niveau de l'incisure jambière.

Lorsqu'on est parvenu, par des essais successifs et *patients*, à établir la bonne tension de ces fils, le modèle tient naturellement

en équilibre sur un plan horizontal : c'est le miracle tant attendu !
On peut alors lui faire adopter toutes les positions du pied, par rapport à la jambe, en particulier l'éversion **(Fig. 15)** et l'inversion **(Fig. 16)** de la plante du pied, qui, comme on le constate facilement, s'effectue dans des directions préférentielles, en raison du **caractère « hétéro-cinétique » du cardan tibio-tarsien**.
On peut aussi simuler le pied creux (Fig. 17) avec verticalisation du calcanéus, et le pied plat (Fig. 18) avec l'effondrement de l'arche interne et le valgus du calcanéus.



Modèle 1

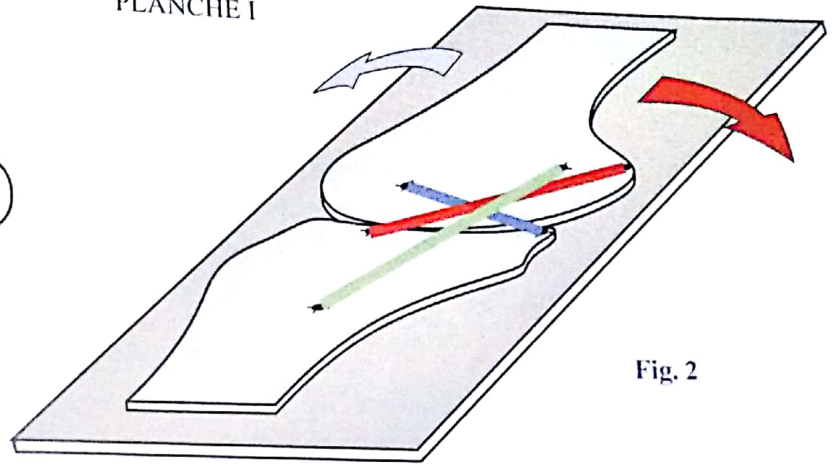


Fig. 2

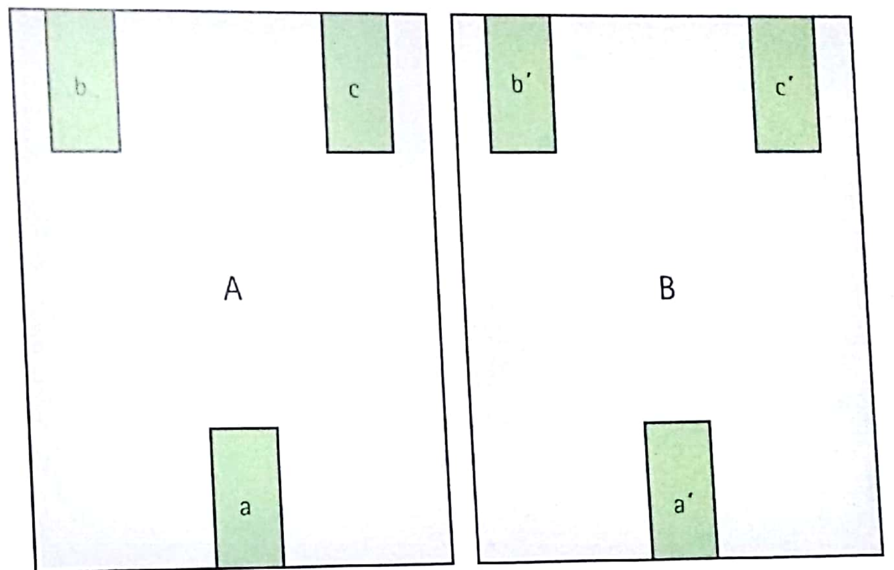
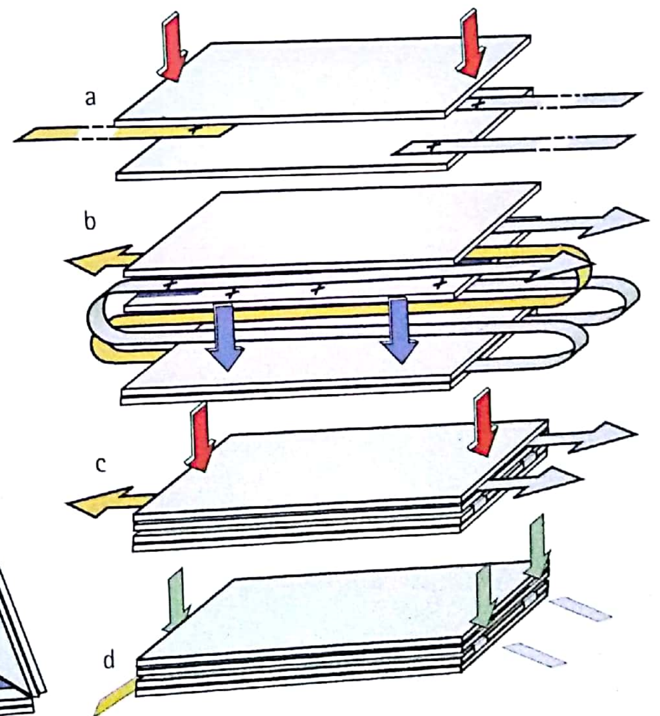


Fig. 3

Fig. 1



Modèle 2

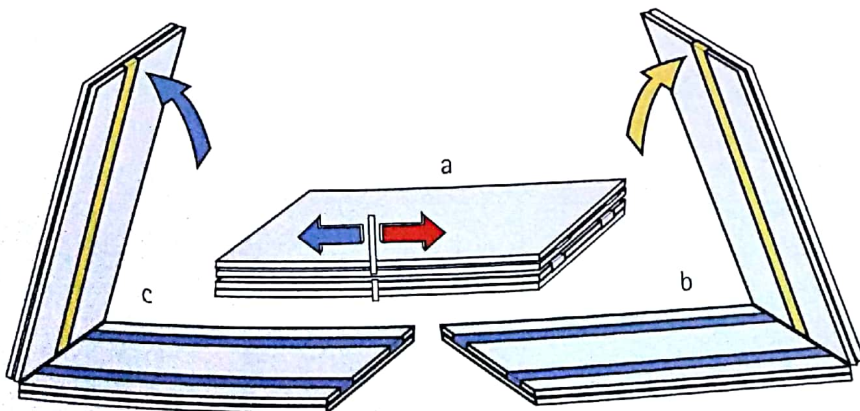
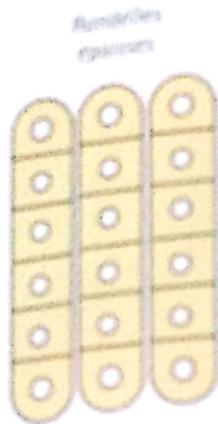


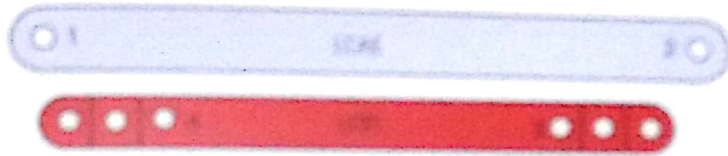
Fig. 4

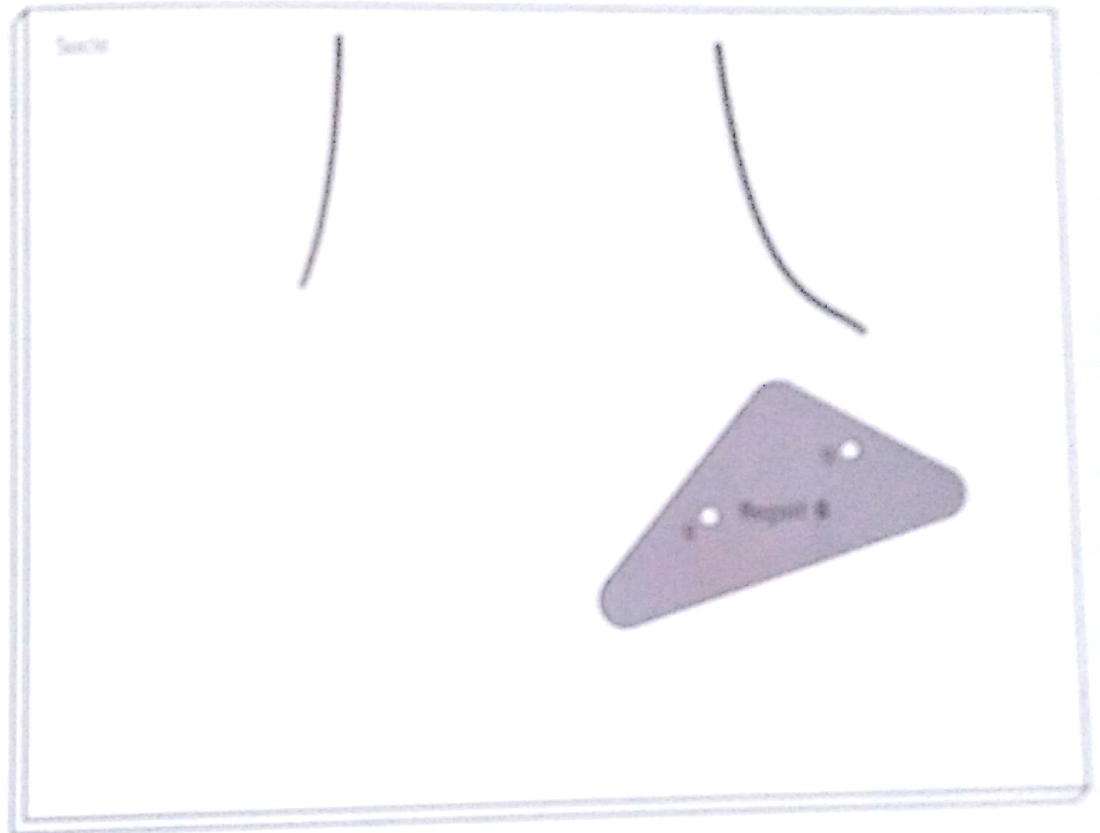
Fig. 5

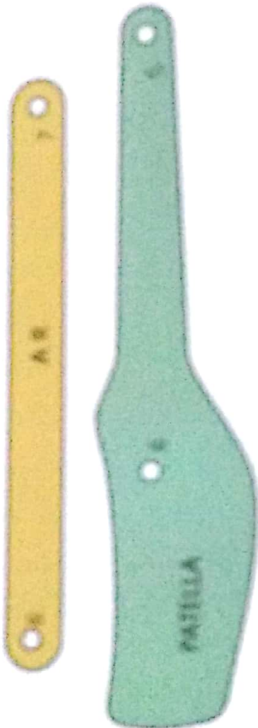
PLANCHE II

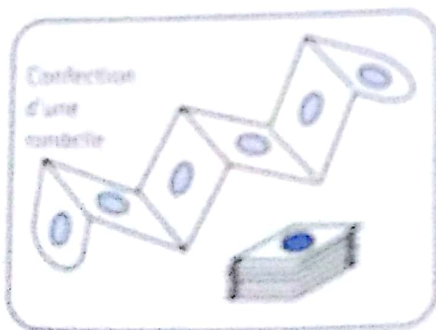
Modèle 1















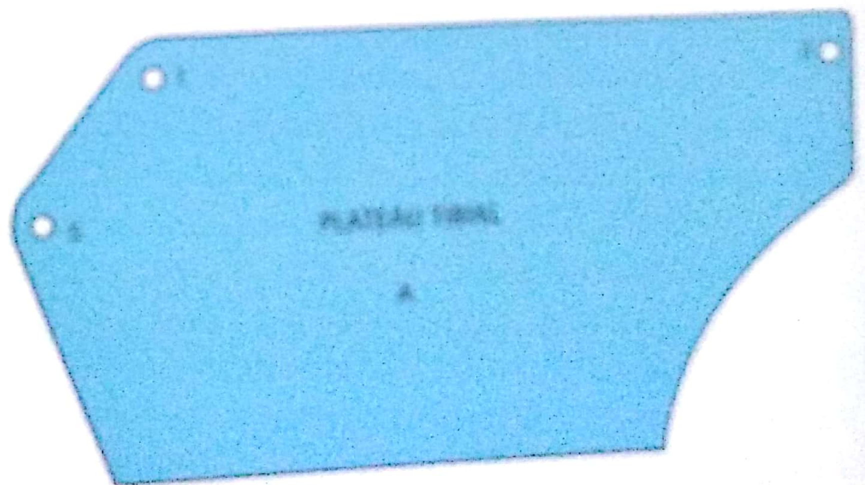


PLANCHE III

Modèle 3

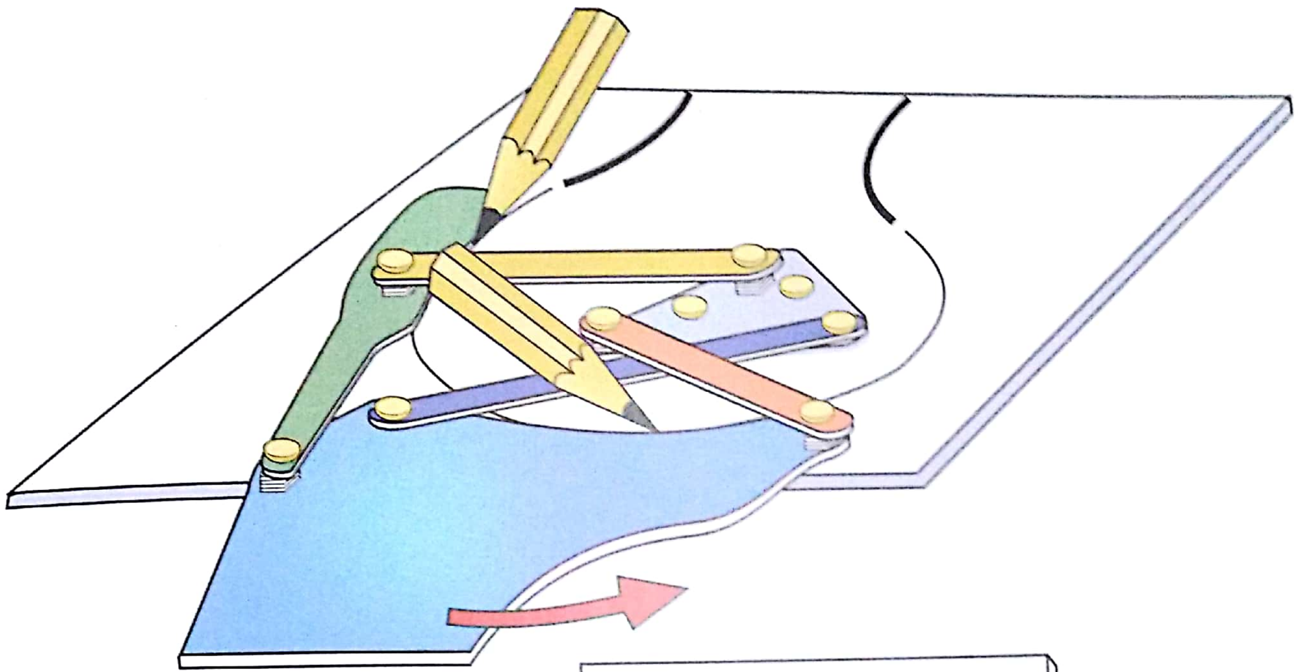


Fig. 7

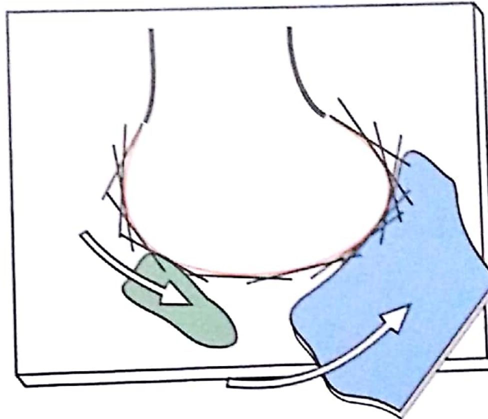


Fig. 8

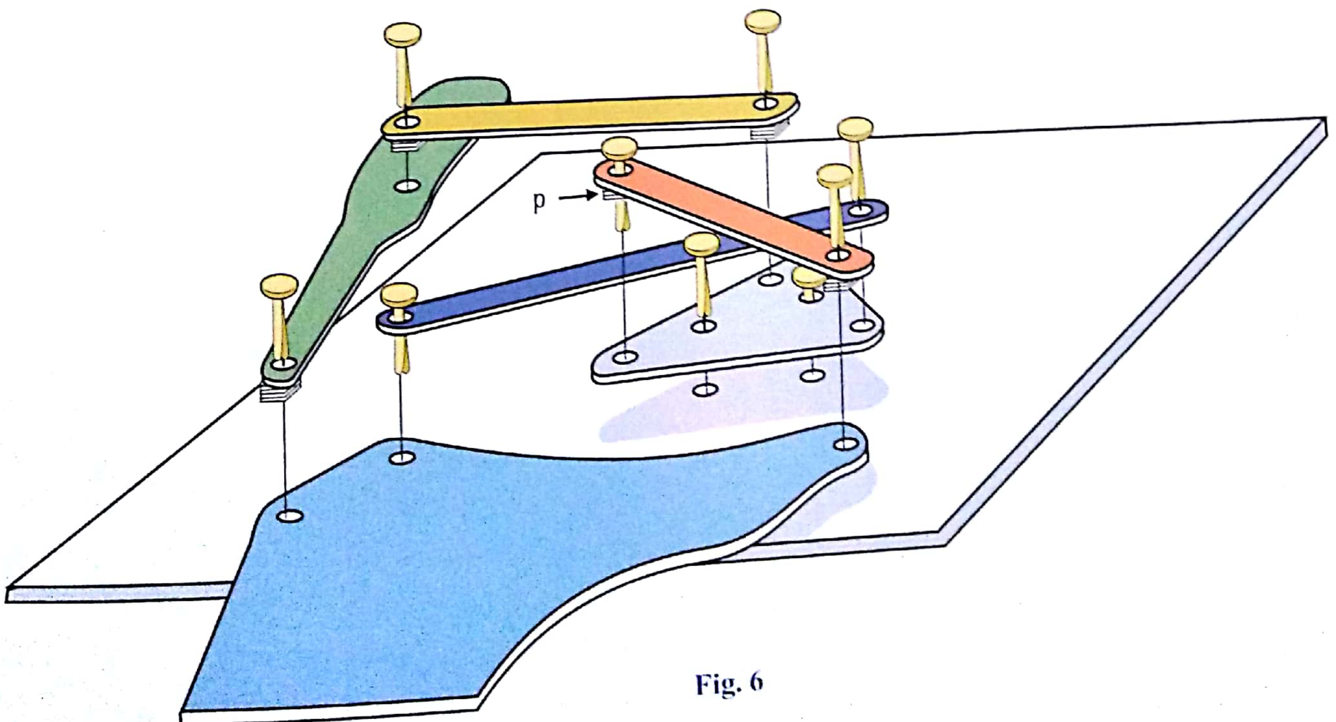
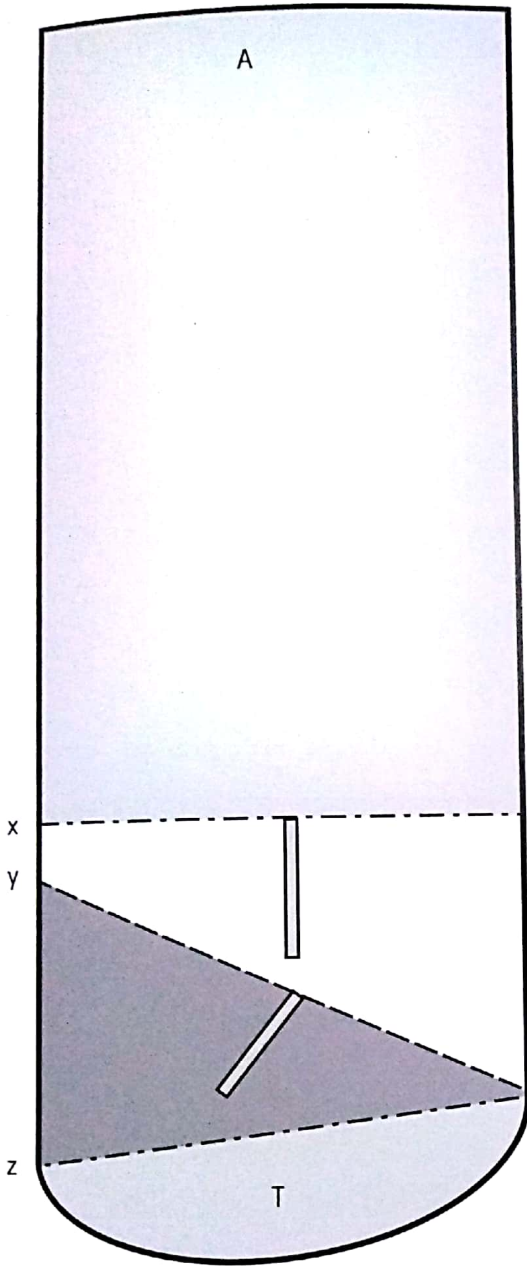
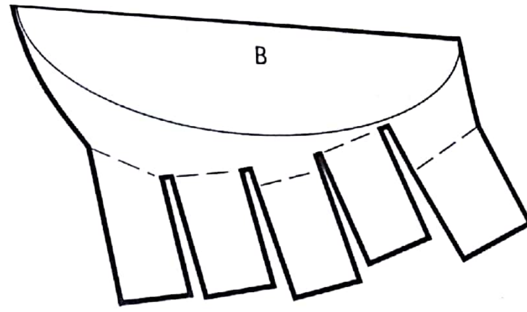


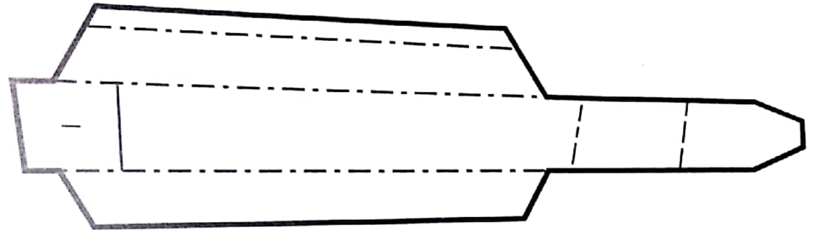
Fig. 6

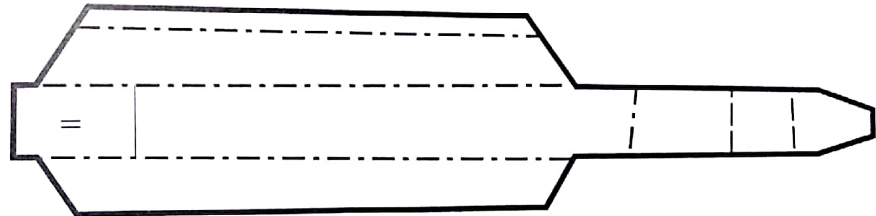
PLANCHE IV

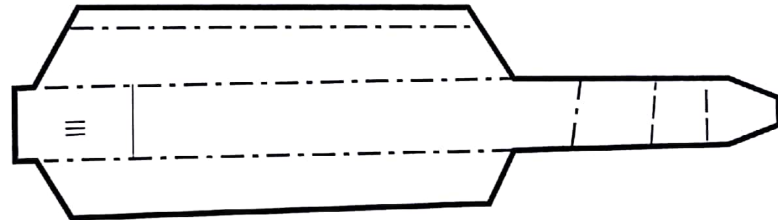
Modèle 4

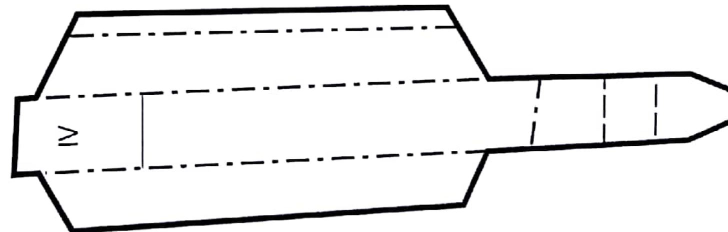


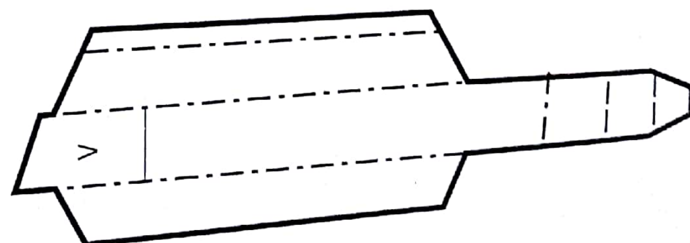


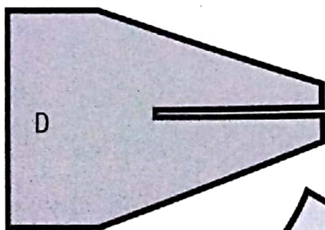












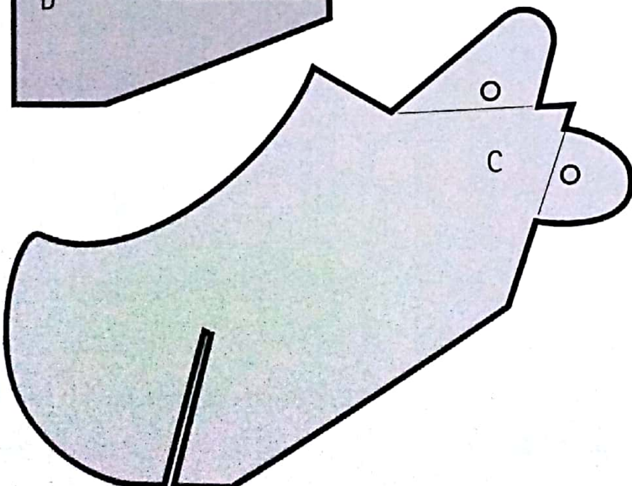


PLANCHE V

Modèle 4

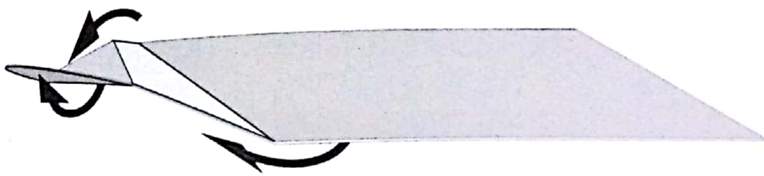


Fig. 10

Fig. 9

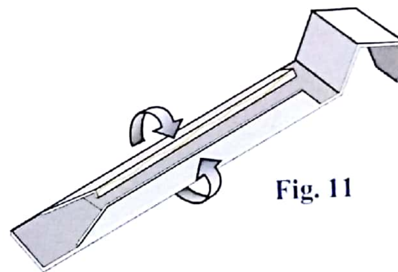


Fig. 11

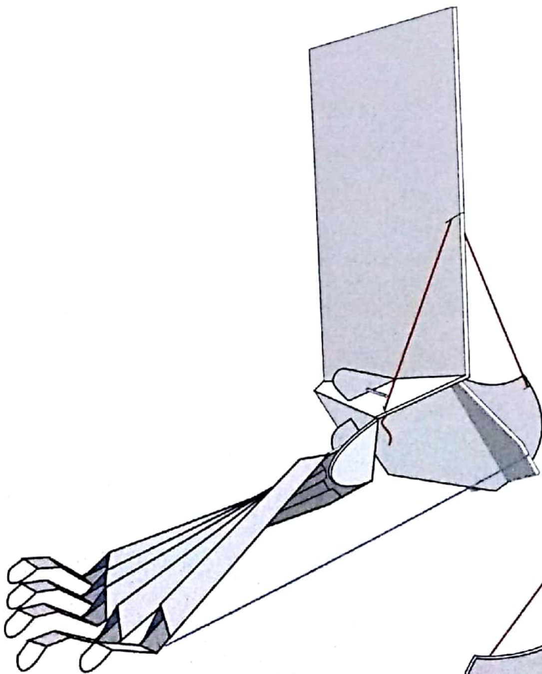


Fig. 12

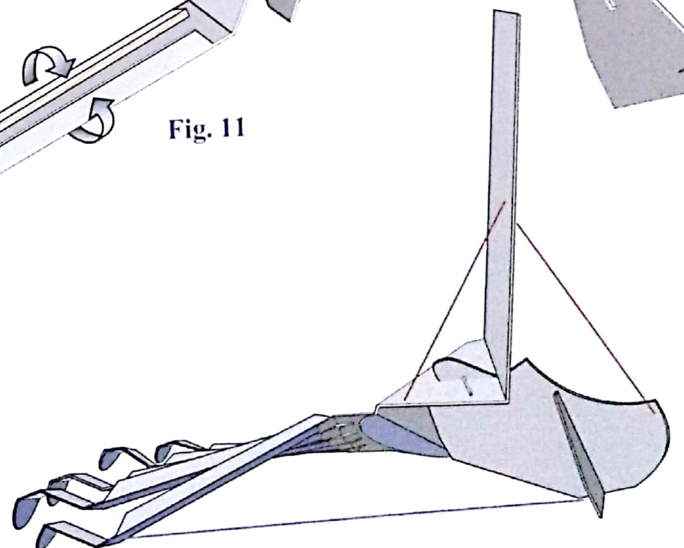


Fig. 13

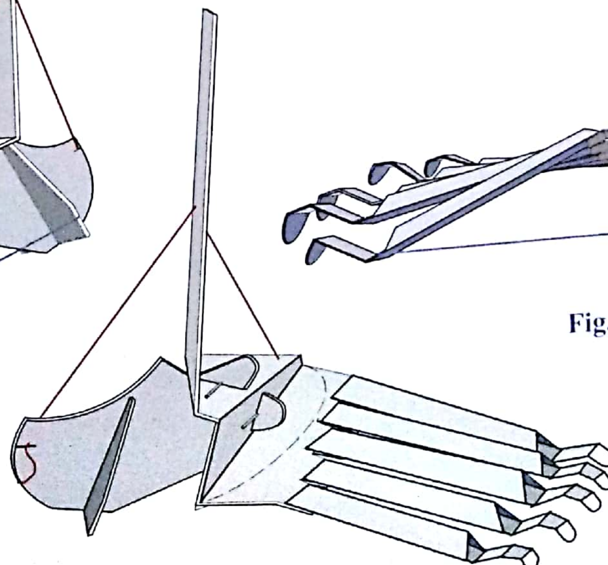


Fig. 14

Modèle 4

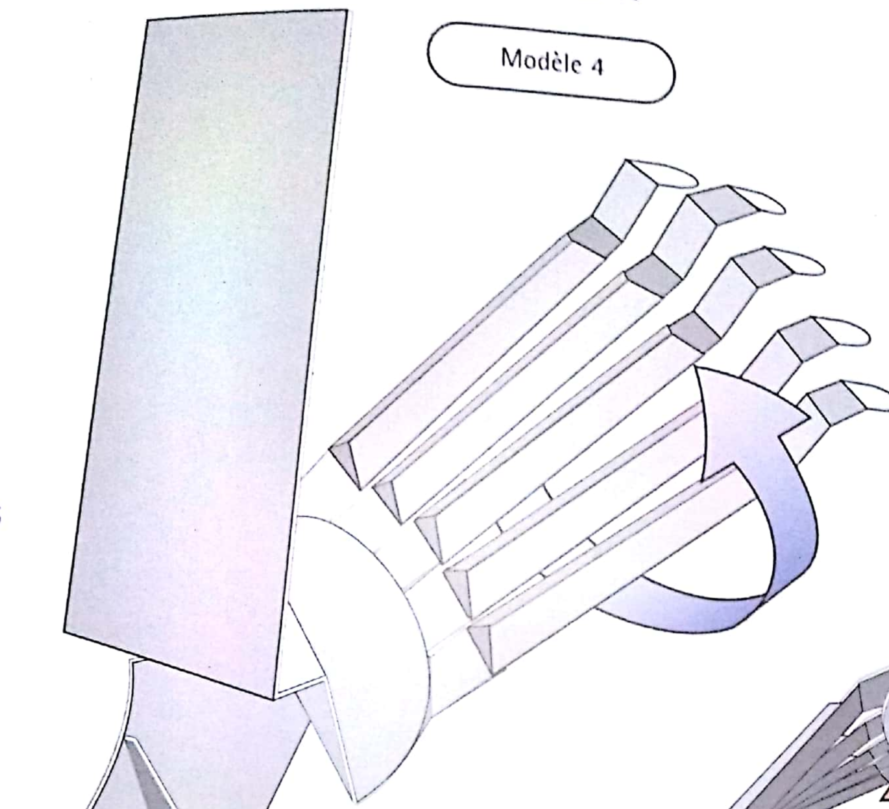


Fig. 15

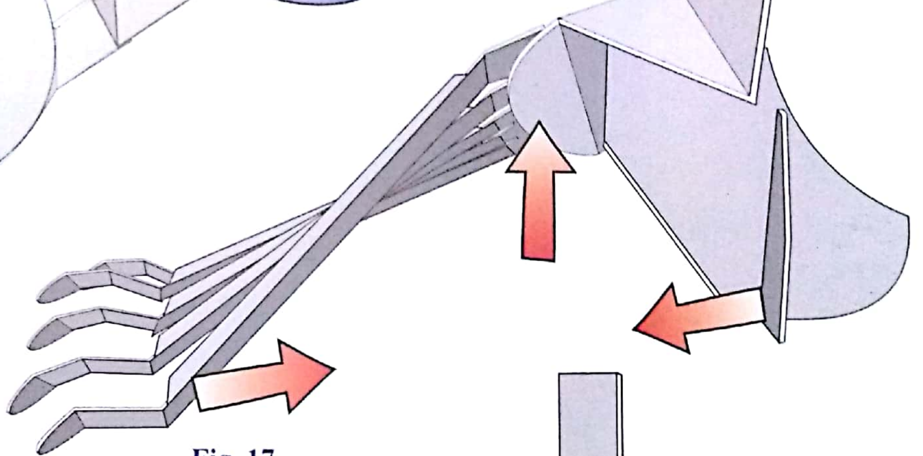


Fig. 17

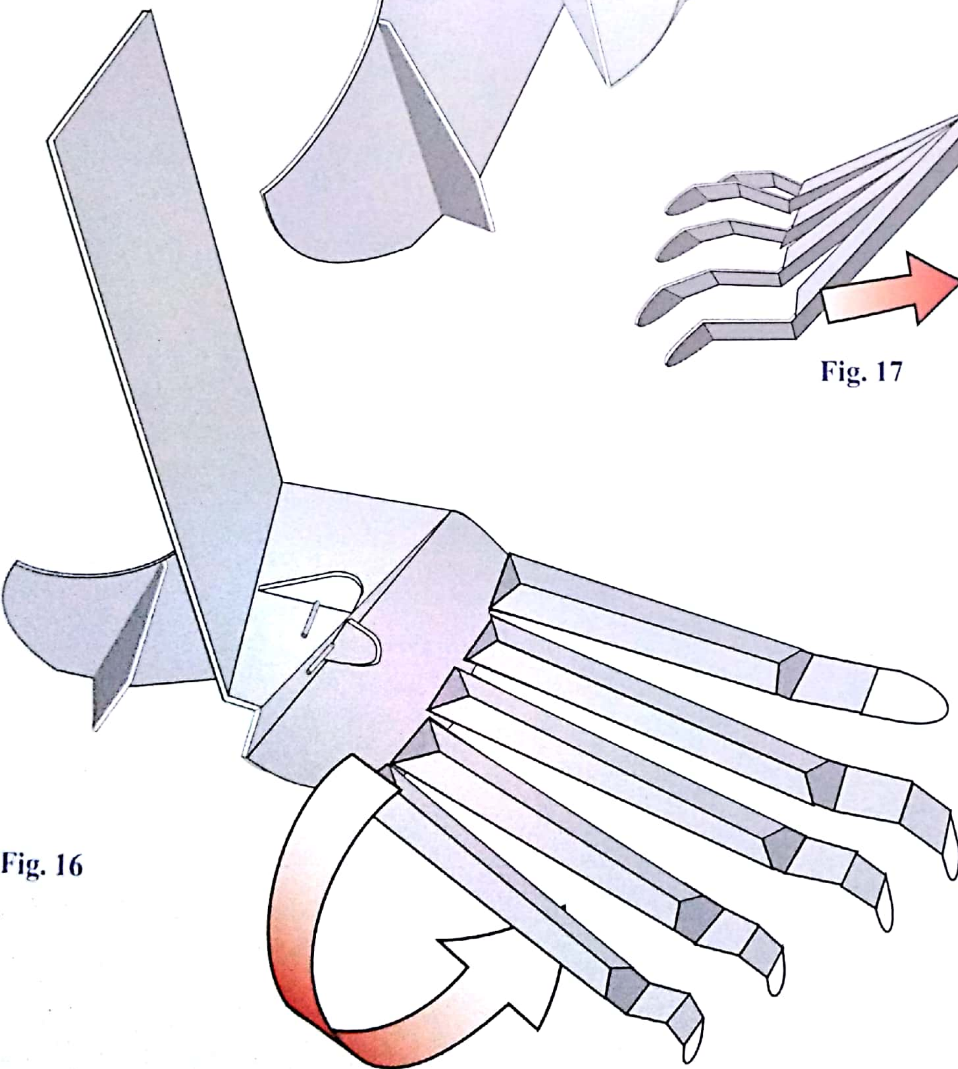


Fig. 16

Fig. 18

Ce Volume II, dédié au *Membre inférieur*, est le dernier à avoir été complètement refondu en une sixième édition, non seulement **mise en couleurs** mais également **réécrite et enrichie de nouveaux textes.**

Notamment :

- Un schéma synoptique des facteurs de stabilité du genou.
- L'explication de la présence de deux os à la jambe, à la lumière de la physiologie de la cheville.
- La notion de cardan hétérocinétique de l'ensemble cheville et arrière pied.
- La notion importante de loges de la jambe.
- Un nouveau chapitre consacré à la physiologie de la marche.
- Un tableau synoptique des nerfs du membre inférieur.
- Et en fin d'ouvrage : un renouvellement des modèles mécaniques, véritables schémas à trois dimensions doués de mobilité, à construire soi-même, éléments didactiques essentiels tant pour l'étudiant que pour l'enseignant.

Avec cette sixième édition du Volume II s'achève la refonte de l'*Anatomie fonctionnelle*, conçue et écrite il y a désormais plus de quarante ans, et qui a remis au goût du jour la biomécanique – jusqu'alors traitée de façon quasi anecdotique dans les livres d'anatomie humaine. Grâce à cette impulsion, chaque ouvrage d'anatomie développe aujourd'hui largement la dimension fonctionnelle de l'appareil locomoteur; en un mot, c'est devenu une science quasi incontournable.

Cet ouvrage s'adresse aux élèves kinésithérapeutes, à tous les étudiants en médecine, mais aussi aux médecins et aux chirurgiens en exercice qui désirent approfondir leur connaissance du fonctionnement de l'appareil locomoteur.



On ne présente plus le docteur Adalbert I. Kapandji, mondialement connu dans les milieux de la chirurgie orthopédique et chez les kinésithérapeutes.
Après une longue carrière comme chirurgien orthopédiste, puis comme chirurgien de la main, membre de plusieurs Sociétés internationales, il se consacre à temps plein à la réédition des trois volumes de son ouvrage, *Anatomie fonctionnelle – Physiologie de l'appareil locomoteur*, actuellement traduit en onze langues. Comme pour les précédentes éditions, le docteur Adalbert I. Kapandji a réalisé et mis en couleurs lui-même l'ensemble des schémas qui illustrent son ouvrage.